

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

11^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θεσσαλονίκη 14 - 16 Μαρτίου 2018

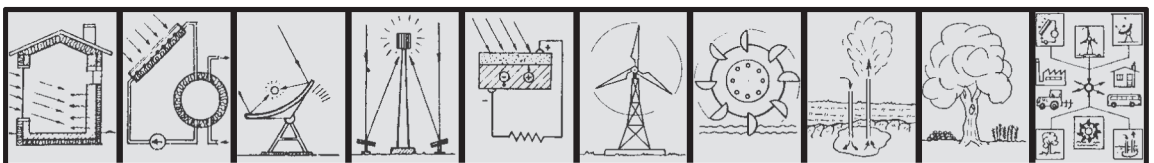
Συνεδριακό Κέντρο ΚΕ.Δ.Ε.Α. του Α.Π.Θ.



ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΤΟΜΟΣ Β΄

Διοργάνωση
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ

Υπό την αιγίδα της
Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ



IHT

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

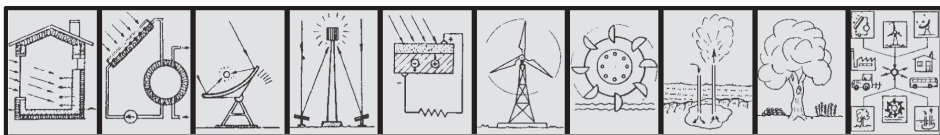
11^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θεσσαλονίκη
14 - 16 Μαρτίου 2018

Συνεδριακό Κέντρο ΚΕ.Δ.Ε.Α. του Α.Π.Θ.



ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΤΟΜΟΣ Β΄



11^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΤΟΥ Ι.Η.Τ. ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ISSN 1108 - 3603

Επιμέλεια έκδοσης

Γ. Τσιλιγκιρίδης, Γ. Μαρτινόπουλος, Α. Παπαδημητρίου

Έκδοση

Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής

Τ.Θ. 487, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

541 24 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310 996081, 2310 996084 - Fax: 2310 996087

<http://solarinstitute.gr/>, e-mail: iht@eng.auth.gr

Σελιδοποίηση - Επιμέλεια εξωφύλλου

Δημήτρης Ε. Κατέρης

Εκτύπωση - Βιβλιοδεσία

Εκδόσεις Παχούδη



Κ. Μελενίκου 15, τ.κ. 546 36, Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310 216 779, 2310 245 333

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Το Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής έχει τη χαρά να παρουσιάσει σε ηλεκτρονική μορφή τα Πρακτικά του 11^{ου} **ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**, το οποίο συνδιοργάνωσε με το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, υπό την αιγίδα της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Στα Πρακτικά περιλαμβάνονται οι παρουσιάσεις των διακεκριμένων συνάδελφων στα επιλεγμένα θέματα για τα οποία προσκλήθηκαν στο Συνέδριο, καθώς και τα πλήρη κείμενα των 100 επιστημονικών εργασιών, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Συνέδριο. Ο αριθμός των εργασιών, των θεμάτων που παρουσιάστηκαν, αλλά και των συνέδρων είναι ενδεικτικοί της σημαντικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται στην Ελλάδα στον χώρο των ΑΠΕ και της Εξοικονόμησης Ενέργειας.

Εκ μέρους του ΔΣ του ΙΗΤ, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν επιστημονικά, ηθικά και υλικά στην επιτυχή διεξαγωγή του σημαντικού αυτού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας στην χώρα μας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται προς τα μέλη της Οργανωτικής Επιτροπής, της Επιστημονικής Επιτροπής και της Γραμματείας για την άψογη διοργάνωση του Συνεδρίου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και την κοσμητεία της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ για την οικονομική στήριξη του Συνεδρίου, καθώς επίσης και την Επιτροπή Ερευνών του ΑΠΘ για τη δωρεάν διάθεση των χώρων διεξαγωγής του Συνεδρίου.

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2018

*Γ. Τσιλιγκιρίδης
Καθηγητής ΑΠΘ
Πρόεδρος ΙΗΤ*

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γεώργιος Μαρτινόπουλος	Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Πρόεδρος
Θεόδωρος Θεοδοσίου	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Έλλη Κυριάκη	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Κωνσταντίνος Παπακώστας	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Κατερίνα Τσικαλουδάκη	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ανδρίτσος	Νικόλαος	Πρόεδρος Επιτροπής, Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Ανδρουτσόπουλος	Ανδρέας	ΚΑΠΕ, Τμ. Κτιρίων
Αξαρή	Κλειώ	ΑΠΘ, Τμ. Αρχ. Μηχανικών
Αραβαντινός	Δημήτριος	ΑΠΘ, Τμ. Πολ. Μηχανικών
Αρβανίτης	Απόστολος	ΙΓΜΕ, Δ/ση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Νερών
Αργυρίου	Αθανάσιος	Παν. Πατρών, Τμ. Φυσικής
Βουτετάκης	Σπυρίδων	ΕΚΕΤΑ
Δαλαμπάκης	Πασχάλης	ΕΛΓΟ - ΔΗΜΗΤΡΑ
Δημουλιάς	Χάρης	ΑΠΘ, Τμ. Ηλ. Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ
Διακουλάκη	Δανάη	ΕΜΠ, Σχ. Χημικών Μηχανικών
Ζαχαριάδης	Θεόδωρος	ΤεΠαΚ, Τμ. Διαχείρισης Περιβάλλοντος
Ηρακλέους	Ελένη	ΔιΠαΕ, Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας
Θεοδοσίου	Θεόδωρος	ΑΠΘ, Τμ. Πολ. Μηχανικών
Καλδέλλης	Ιωάννης	ΤΕΙ Πειραιά, Τμ. Μηχανολογίας
Κανελλόπουλος	Δημήτρης	ΔΕΗ Ανανεώσιμες
Καούρης	Ιωάννης	Παν. Πατρών, Τμ. Αεροναυπηγών Μηχ. Μηχανικών
Καρακώστας	Θεόδωρος	ΑΠΘ, Τμ. Γεωλογίας
Καρτάλης	Κωνσταντίνος	ΕΚΠΑ, Τμ. Φυσικής
Κατής	Νικόλαος	ΑΠΘ, Τμ. Γεωπονίας
Κατσιφαράκης	Κώστας	ΑΠΘ, Τμ. Πολ. Μηχανικών
Κατσούλας	Νικόλαος	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας ΦΠ&ΑΠ
Κολοκοτσά	Διονυσία	Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχ. Περιβάλλοντος
Κωτσόπουλος	Θωμάς	ΑΠΘ, Τμ. Γεωπονίας
Λαμπρίδης	Δημήτριος	ΑΠΘ, Τμ. Ηλ. Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ
Λάππας	Άγγελος	ΕΚΕΤΑ
Λιάπη	Αικατερίνη	Παν. Πατρών, Τμ. Αρχ. Μηχανικών

Μαθιουλάκης	Μανώλης	ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
Μαρτινόπουλος	Γεώργιος	ΔιΠαΕ, Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας
Μιχαλακάκου	Παναγιώτα	Παν. Πατρών, Τμ. Διαχείρισης Περιβάλλοντος
Μιχόπουλος	Απόστολος	ΤεΠαΚ, Τμ. Διαχείρισης Περιβάλλοντος
Μουσιόπουλος	Νικόλαος	ΑΠΘ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Μπακιριτζής	Αναστάσιος	ΑΠΘ, Τμ. Ηλ. Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ
Μπαλαράς	Κωνσταντίνος	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Μπελεσιώτης	Βασίλης	ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
Μπίκας	Δημήτρης	ΑΠΘ, Τμ. Πολ. Μηχανικών
Μπότσαρης	Παντελής	ΔΠΘ, Τμ. Μηχ. Παραγωγής και Διοίκησης
Παπαγιάννης	Γρηγόρης	ΑΠΘ, Τμ. Ηλ. Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ
Παπαδάκης	Γιώργος	Γεωπονικό Παν. Αθηνών, Τμ. Αξιοποίησης Φυσ. Πόρων
Παπαδόπουλος	Άγις	ΑΠΘ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Παπακώστας	Κωνσταντίνος	ΑΠΘ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Παπαχρήστου	Μαρία	ΑΠΘ, Τμ. Γεωλογίας
Σουλιώτης	Μανώλης	ΠΔΜ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Τουρλιδάκης	Αντώνης	ΠΔΜ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Τσαγκρασούλης	Αριστείδης	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Αρχ. Μηχανικών
Τσιακάρας	Παναγιώτης	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Τσικαλουδάκη	Κατερίνα	ΑΠΘ, Τμ. Πολ. Μηχανικών
Τσιλιγκιρίδης	Γιώργος	ΑΠΘ, Τμ. Μηχ. Μηχανικών Πρόεδρος ΙΗΤ
Τσούτσος	Θεοχάρης	Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχ. Περιβάλλοντος
Φούντη	Μαρία	ΕΜΠ, Σχ. Μηχ. Μηχανικών
Φυτίκας	Μιχάλης	ΑΠΘ, Τμ. Γεωλογίας
Χαβιάρόπουλος	Παναγιώτης	Δρ. Μηχ. Μηχανικός, τ. Δ/νση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

Αργυρούλα Παπαδημητρίου, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
 Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, ΤΘ 487, 541 24 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
 Τηλ: +30 2310-996081, 996084, fax: +30 2310-996087,
 e-mail: iht@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ.....

ΤΟΜΟΣ Α΄

ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΗΝ ΕΠΟΧΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ <i>Δ. Μπίκας</i>	3
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ <i>Σ. Καλογήρου</i>	31
Η ΑΙΣΙΟΔΟΞΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΛΑΝΗΤΗ ΕΧΕΙ ΟΝΟΜΑ: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Δ. Κανελόπουλος</i>	65

Αιολική - Υδραυλική - Κυματική ενέργεια

ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ; <i>Ι. Κρητικός, Κ. Γκαράκης</i>	93
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΕΠΑΓΟΜΕΝΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ <i>Η. Μαλεφάκη, Ε. Κωνσταντινίδης</i>	105
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ WELLS <i>Α. Κρίκας, Κ. Βαφειάδης και Α. Τουρλιδάκης</i>	117
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ <i>Κ. Βαφειάδης, Α. Τουρλιδάκης</i>	129
ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ-ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΝΗΣΙΩΝ <i>Γ. Νομικός, Κ.Α. Καββαδίας, Ι.Κ. Καλδέλλης</i>	141

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΜΟΡΟΥ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ <i>Π. Στίνης, Δ. Ζαφειράκης, Ι.Κ. Καλδέλλης</i>	151
--	-----

ΑΠΕ και εκπαίδευση

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΑΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ INTERNATIONAL HELLENIC UNIVERSITY (ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ) <i>Δ. Κανελλόπουλος</i>	163
---	-----

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ <i>Ε. Ανδρέου, Κ. Αζαρλή, Αικ. Μερέση, Αικ. Παρπαίρη</i>	175
--	-----

ΑΠΕ και περιβάλλον

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΤΙΚΕΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΤΙΡΙΩΝ <i>Ε. Αλεξανδρή, Α. Ανδρουτσόπουλος</i>	189
--	-----

Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΕΜΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΧΕΔΩΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ (NZEB) <i>Π. Χασάς, Θ. Θεοδοσίου, Κ. Κοντολέων, Δ. Μπίκας</i>	201
--	-----

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ) ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΩΝ <i>Ε. Γαμά, Ε. Κυριάκη, Α. Μ. Παπαδόπουλος</i>	215
--	-----

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ <i>Δ. Σαββαστάκη-Σεβαστάκη, Ε. Κτιστάκη, Χ. Γαρμά</i>	227
--	-----

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΚΟΙΝΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ (CESBA MED) <i>Κ Μπαλαράς, Κ. Δρούτσα, Ε Δασκαλάκη, Σ. Κοντογιαννίδης</i>	239
---	-----

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΑΡΚΑ ΑΝΑΨΥΧΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ "ΑΝΤΩΝΗΣ ΤΡΙΤΣΗΣ" <i>Γ. Τζάνες, Π. Κεντίδης, Αιμ. Κονδύλη, Ι.Κ. Καλδέλλης</i>	253
--	-----

Αποθήκευση ενέργειας - Υδρογόνο

ΠΡΟΘΕΣΗ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΘΥΜΙΑ ΠΛΗΡΩΜΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΛΥΣΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ <i>Σ. Καρύτσας, Ο. Πολύζου, Κ. Καρύτσας</i>	265
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ESTMAP <i>Α. Αρβανίτης</i>	279
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΑΝΘΡΑΚΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ H_2 ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ <i>Α. Καφετζής, Χ. Ζιώγου, Σ. Παπαδοπούλου, Σ. Βουτετάκης, Π. Σεφερλής</i>	291
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗΣ ΒΙΟΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ <i>Α. Σερέτης, Α. Βουζάβαλης, Σ. Γεωργαντάς, Α. Μπρούζγου, Σ. Κόντου, Π. Τσιακάρας</i>	303
ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ <i>Α. Νουσιδίλης, Ε. Κόντης, Γ. Κρυωνίδης, Γ. Χριστοφορίδης, Σ. Αυξέντης, Γ. Γεωργίου, Γ. Παπαγιάννης</i>	315

Βιομάζα - Βιοκαύσιμα

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΞΥΛΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΔΕΚΑΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΦΥΤΕΙΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ <i>FRAXINUS ANGUSTIFOLIA Vahl.</i> ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ <i>Κ. Α. Σπανός*, Δ. Γαϊτάνης, Ν. Νάνος</i>	325
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ 2ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΑΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΡΕΤΣΙΝΟΛΑΔΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ <i>Ε. Ηρακλέους, Α. Λάππας</i>	335
ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΣΤΟΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ <i>Ε.Φ. Ηλιοπούλου, Μ. Παπαπέτρου, Χ. Μιχαήλωφ, Α.Α. Λάππας</i>	347
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ, ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ <i>Γ.Ι. Σιακαβέλας, Κ. Παπαγερίδης, Σ. Σταύρου, Π.Ι. Σιακαβέλας, Ν.Δ. Χαρισίου, Μ.Α. Γούλα</i>	357

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ <i>A. Χατζηπασχάλη, A. Σταμάτης, N. Ανδρίτσος</i>	367
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ (ΠΕΛΛΕΤΣ) ΑΠΟ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΤΗΣ ΟΙΝΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ <i>E. Dolmaci, Π. Α Φωκαΐδης</i>	377
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΞΥΛΕΙΑΣ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΕΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΑΝΩΓΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ) <i>N. Σαββάκης, Σ. Τουρνάκη, N. Καλλέργης, Θ. Τσούτσος</i>	385
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΗΚΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΞΥΛΟΥ (PELLETS) ΠΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΓΟΡΑ <i>B. Καμπερίδου, I. Μπαρμπούτης</i>	395
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ <i>M. Λουκαϊδής, Γ. Ιτούδης, Γ. Περκουλίδης, N. Μουσιόπουλος</i>	403
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ FENTON ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ <i>K.Πλάκας, I. Salmerón, I. Oller, I. Sirés, M.I. Maldonado, S. Malato, A. Καράμπελας</i>	411
ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΚΑΙ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΗ-ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ <i>A. Σερέτης, N. Μαλαμάς, Σ. Κατσαρός, A. Μπρούζγου, Π. Τσιακάρας</i>	423
ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΛΛΕΤΩΝ ΑΠΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΥΛΟΤΟΜΙΩΝ ΔΡΥΟΣ, ΠΕΥΚΗΣ ΚΑΙ ΛΕΥΚΗΣ <i>B. Φιλίππου, Σ. Καραστεργίου, I. Φιλίππου και Κ. Τσιώτας</i>	431
Γεωθερμία	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ <i>K.T. Παπακώστας, A. Τσαμήτρος, Γ. Μαρτινόπουλος</i>	445
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ <i>M. Παπαχρήστου, N. Ανδρίτσος, A. Αρβανίτης, Π. Δαλαμπάκης</i>	457
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Σ. Καρύτσας, O. Πολύζου, K. Καρύτσας</i>	469

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΚΕΦΑΛΗ <i>Δ. Σκορδάς, Ι. Καμάς, Κ. Γεωργιάδης, Αιμ. Κωμοδρόμος</i>	483
ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO ₂ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Α. Αρβανίτης, Ν. Κούκουζας, Β. Γεμενή, Π. Κουτσοβίτης</i>	493

Ενεργειακή πολιτική

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΠΙ ΤΟΥ ΙΣΧΥΟΝΤΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Ι. Π. Χαλδέςος, Σ. Κ. Καρύτσας και Κ. Καρύτσας</i>	511
MAESTRALE: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΑΛΑΖΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ <i>Τ. Ανδρεάδου, Α. Φωτιάδου, Δ. Κονταξάκης, Κ.Β. Ιακώβου, Ηλ. Παπαγιαννόπουλος- Μιαούλης</i>	521
ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΓΙΑ ΕΝΤΑΞΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑ <i>Α. Βαρθολομαίος, Ν. Καλογήρου, Ε. Αθανασίου, Μ. Παπαδοπούλου</i>	533
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΠ ΤΩΝ ΚΛΑΣΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΕ15 <i>Μ. Μπριλάκη, Γ. Γεμενετζή, Λ. Βατικιώτης, Ε. Ζέρβας</i>	547
Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ <i>Αλ. Κόντζηλας, Ι. Μαύρος, Ι. Νίκας, Διον. Παπαχρήστου</i>	557
ΤΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ <i>Δ. Παπαχρήστου, Π. Καπετανά, Π. Δαλιούρης, Θ. Πετμεζάς</i>	573
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΝΟΙΚΟΚΥΡΙΩΝ ΣΤΗ Β. ΕΛΛΑΔΑ – ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΦΤΩΧΕΙΑΣ <i>Σ.Ν. Μποέμη, Α. Παπαδόπουλος Γ. Πανάρας</i>	585
ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ <i>Δ. Μπουλογιώργου, Κ. Χριστόπουλος, Χρ. Παπαποστόλου, Ι.Κ. Καλδέλλης</i>	599
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ <i>Γ. Μαύρος, Α. Κόντζηλας, Γ. Νίκας, Δ. Παπαχρήστου</i>	611

ΤΟΜΟΣ Β΄**Ενσωμάτωση ΑΠΕ σε κτίρια**

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ <i>Ι. Ζιώγου, Α. Κ. Μιχόπουλος, Β. Βούλγαρη, Θ. Ζαχαριάδης</i>	627
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΟΝΟΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ <i>Α. Σερασιδίου, Ε. Πετούσης, Γ. Μαρτινόπουλος</i>	639
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE (ORC) <i>Θ. Ευσταθιάδης, Β. Γκουτζαμάνης, Α. Κάλφας</i>	651
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΤΕΓΗ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΕΙΟΥ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Θ. Μπαρτζάνας, Ν. Κατσούλας</i>	663
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΑΕΡΑ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ <i>Α. Λιλλή, Δ. Κολοκοτσά</i>	675
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΦΟΙΤΗΤΙΚΕΣ ΕΣΤΙΕΣ ΞΑΝΘΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ REUNI <i>Π. Μπότσαρης, Κ. Λυμπερόπουλος, Π. Γκιούρκα, Π. Μπεκάκος, Π. Πιστοφίδης, Α. Πεχτελίδης</i>	685

Εξοικονόμηση ενέργειας

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ <i>Δ. Γκορόγιας, Γ. Πανάρας, Α. Αφεντουλίδης</i>	699
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΗΣ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ <i>Ρ. Βαλκάνος, Κ. Πανάγος, Γ. Πανάρας</i>	709
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ: ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΝΕΑΠΟΛΗΣ-ΣΥΚΕΩΝ <i>Χ. Σοφοπούλου, Αικ. Μερέση</i>	719
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΒΗΤΩΝ	

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ <i>Κ.Τ. Παπακώστας, Φ. Πίτσας</i>	731
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΩΝ <i>Θ. Σλίνη, Κ.Τ. Παπακώστας, Ν. Μουσιόπουλος</i>	743
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ <i>Κ. Δρούτσα, Σ. Κοντογιαννίδης, Κ. Μπαλαράς, Έ. Δασκαλάκη, Α. Αργυρίου</i>	755
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛΩΝ ΚΕΝΟΥ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ <i>Ε. Κυριάκη, Χ. Γκάρος, Α. Παπαδόπουλος</i>	767
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ: ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗ <i>Στ. Τσόκα, Κ. Τσικαλουδάκη, Θ. Θεοδοσίου, Δ. Μπίκας</i>	779
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΡΙΖΙΚΗ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ <i>Α. Μανωλίτσης, Ι. Ατσόνιος, Γ. Σεμιτέλος, Ι. Μανδηλαράς, Δ.Κοντογεώργος, Μ. Φούντη</i>	791
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ <i>Θ. Μπακάλης, Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φειδαρος, Α. Τσαγκρασούλης</i>	803
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ – ΝΕΡΟΥ <i>Γ. Α. Μουζεβίρης, Κ.Τ. Παπακώστας</i>	815
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ. ΜΙΑ ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΡΗΤΗΣ <i>Δ. Κατσαπρακάκης, Κ. Γεωργιλιά, Α. Μιχόπουλος, Ν. Ψαρράς, Γ. Ζηδιανάκης, Δ. Χρηστάκης, Κ. Κονταξάκης, Σ. Κάνουρας</i>	827
Έξυπνα δίκτυα - Λήψη αποφάσεων σε ενεργειακά έργα	
ΑΣΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ: ΑΕΙΦΟΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΥΦΥΙΑΣ <i>Μ. Μπίρη, Ε. Αλεξανδρή</i>	843
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ <i>Κ. Πετρουτσάτου</i>	855
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΣΕ ΕΝΙΑΙΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΟΡΙΖΟΝΤΑ <i>Π. Μπάκανος, Κ.Λ. Κατσιφαράκης</i>	867

ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ <i>A. Ανδρουτσόπουλος, A. Χαραλαμπίδης, K. Κτωρίδης, O.M. Jensen</i>	881
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>M. Μπολολιά, K. Σφακιανάκη, A. Ανδρουτσόπουλος</i>	891

Ηλιακά - Θερμικά

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΚΛΙΜΑΚΟΕΙΔΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (CASCADE) ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ- ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>E. Μπέλλος, X. Τζιβανίδης, Γ. Τσιφής</i>	907
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ <i>B. Δρόσου, A. Δημούδη, E. Κυριάκη, A.M. Παπαδόπουλος</i>	919
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CARNOT, ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΖΕΣΤΟ ΝΕΡΟ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΕΝΟΙΚΙΑΖΟΜΕΝΑ ΔΩΜΑΤΙΑ ΣΤΟ ΣΙΔΑΡΙ ΤΗΣ ΚΕΡΚΥΡΑΣ <i>Σ.Χ. Αλεξόπουλος, Γ. Γαβριηλίδης, X. Παπασπήλιου</i>	931
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ <i>Σ. Χ. Αλεξόπουλος</i>	943
ΗΛΙΑΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΕΝΟΥ <i>M. Σουλιώτης, Σ. Παπαευθυμίου, I. Καούρης</i>	951
ΘΕΡΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΕΡΟΣ <i>Π. Τουμπουλίδης, A. Δημούδη, Π. Κοσμόπουλος, Σ. Ζώρας</i>	963
ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΟΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ <i>E. Μαθιουλάκης, Η. Παπανικολάου και B. Μπελεσιώτης</i>	977
Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ <i>N. Παπαμανώλης</i>	989
ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΔΕΚΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ <i>Π. Μπότσαρης, K. Λυμπερόπουλος, A. Πεχτελίδης, Π. Γκιούρκα, Π. Μπεκάκος, Π. Πιστοφίδης, Δ. Τσεμπερλίδου</i>	997
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΩΝ ΝΕΡΟΥ ΕΦΟΔΙΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ <i>Γ. Παπαθανασόπουλος, I. Καούρης, M. Σουλιώτης</i>	1007

Ενεργειακή κλιματολογία**ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ
ΑΝΑ ΧΡΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ**

A. Γαγλία, A. Αργυρίου, E. Διαλυνάς, Έ. Κωστοπούλου 1017

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΝΕΦΩΝ, ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΑΠΟ ΨΗΦΙΑΚΕΣ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΘΟΛΟΥ**

A. Καζαντζίδης, Π. Τζουμανίκας, B. Σαλαμαλίκης, S. Wilbert, P. Kuhn, P. Blanc 1027

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

K.A. Καββαδίας, A.E. Καραμάνου, Γ. Τζάνες, X. Καμπεζίδης, K. Μουστρής 1033

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΜΥ ΣΤΗ ΝΟΤΙΟ ΕΛΛΑΔΑ**

I. Τσιμούρα, I. Σιδηρόπουλος, E. Τσιγαρά, Γ. Τσιλιγκιρίδης 1043

Φυσική κτιρίων**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ
ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ**

B. Κικίδου, Δ. Μπόζης, Γ. Μαρτινόπουλος 1057

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ**

A. Τσαγκρασούλης, Λ. Δούλος, A. Κονταδάκης, Φ. Τοπαλής 1067

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤ.
ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΦΥΤΕΜΕΝΑ ΔΩΜΑΤΑ**

A. Ανδρουτσόπουλος, Γ. Κοτσίρης, Π.Α. Νεκτάριος 1079

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΔΟΜΗΣ ΜΕ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SSPCM)**

Δ. Ζεγγίνης, Κ. Κοντολέων 1089

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΤΗΡΙΟΥ (BIM) ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ
ΖΩΗΣ (LCA)**

X. Παντελή, Π. Φωκαΐδης 1101

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΨΥΧΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΜΙΑ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗ
ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

Σ. Τσόκα, Κ. Τσικαλουδάκη, Κ. Τολικά, Δημήτρης Μπίκας 1109

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ
ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΑΦΡΙΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ**

A. Καραούλης 1121

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΕΞΗΣ & ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΓΡΑΦΕΙΩΝ <i>Π. Αντωνιάδου, Δ. Καραθάνας, Α. Παπαδόπουλος</i>	1131
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΑΙΓΟΠΡΟΒΑΤΟΣΤΑΣΙΟ <i>Δ. Φεΐδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας, Ν. Κατσούλας</i>	1143
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΔΙΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ <i>Β. Παππά, Μ. Πάνος, Μ. Μανωλέσος, Δ. Μπούρης</i>	1155
Φωτοβολταϊκά	
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ (Φ/Β) ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ 97 kW _p ΤΗΝ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΤΕΤΡΑΕΤΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Κ. Γκαράκης</i>	1169
ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΑΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Κ. Γκαράκης, Ε. Γκαράκη</i>	1181
ΕΤΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΟΥ <i>Ε. Μπέλλος, Χ. Τζιβανίδης</i>	1193
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ / ΘΕΡΜΙΚΩΝ (PV/T) ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ <i>Ν. Αρναουτάκης, Μ. Σουλιώτης, Α. Βούρος, Σ. Παπαευθυμίου</i>	1205
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΟΥΣΙΑ <i>Δ. Χαλκιάς, Δ. Λοΐζος, Γ. Παπανικολάου</i>	1217
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ / ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ <i>Π. Αξιάπουλος, Ε. Σακελλαρίου</i>	1229
ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΑΡΚΟΥ 1 MW _p <i>Α. Οικονομόπουλος, Γ. Σβεντζίδης, Γ. Τσιλιγκιρίδης</i>	1237
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΗΣ 9,8 kW _p <i>Β. Κωνσταντάρας, Κ. Κοσμάς, Χ. Σιδηρόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης</i>	1249

Ενσωμάτωση ΑΠΕ σε κτίρια

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ισίδωρος Ζιώγου, Απόστολος Κ. Μιχόπουλος*, Βασιλική Βούλγαρη, Θεόδωρος
Ζαχαριάδης

Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο
Κύπρου, Τ.Θ. 50329, Τ.Κ. 3603, Λεμεσός, Κύπρος.

*e-mail: a.michopoulos@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη συγκέντρωση κατοίκων σε πόλεις ανά τον κόσμο μεταβάλλει την τοπική γεωμορφολογία και επιδρά έντονα στο περιβάλλον. Ο κτιριακός τομέας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για ετήσια αύξηση της τάξης του 3% στις συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με την κατανάλωση ενέργειας από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, εντείνει την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Με στόχο την αντιμετώπιση αυτών των αρνητικών επιδράσεων των κτιρίων, προτείνονται και εφαρμόζονται ποικίλες τεχνικές και τεχνολογίες μεταξύ των οποίων και η ενσωμάτωση πράσινων οροφών και φωτοβολταϊκών συστημάτων σε αυτά. Η παρούσα μελέτη εξετάζει τα οφέλη της συνδυαστικής εφαρμογής αυτών των δύο τεχνολογικών λύσεων σε ένα τυπικό κτίριο γραφείων για τις κλιματικές συνθήκες της Κύπρου. Η ενεργειακή ανάλυση του κτιριακού κελύφους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του δυναμικού λογισμικού προσομοίωσης EnergyPlus σε ωριαία βάση. Τα αποτελέσματα της ζήτησης ενέργειας του κτιριακού κελύφους ανάχθηκαν τελικά σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας με τη βοήθεια ειδικού κώδικα προσομοίωσης της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας, που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και ψύξη του κτιρίου και των εθνικών συντελεστών μετατροπής της τελικής ενέργειας σε πρωτογενή. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα πραγματοποιείται η σύγκριση των εναλλακτικών τεχνολογιών και προσδιορίζονται τα ενεργειακά οφέλη. Η περιβαλλοντική τους αξιολόγηση γίνεται με τη χρήση δεικτών που αφορούν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), διοξειδίου του θείου (SO₂) και οξειδίου του αζώτου (NO_x) οι οποίες προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας. Η οικονομική βιωσιμότητα των προτεινόμενων τεχνολογικών λύσεων εξετάζεται για χρονικό ορίζοντα 20 ετών, και σε αυτή περιλαμβάνονται το αρχικό κόστος κατασκευής, το ετήσιο κόστος συντήρησης και κατανάλωσης ενέργειας καθώς και το περιβαλλοντικό κόστος που σχετίζεται με τις εκπομπές CO₂, NO_x και SO₂. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι οι προτεινόμενες τεχνολογικές παρεμβάσεις είναι ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά επωφελείς. Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του τυπικού κτιρίου γραφείων, οι εκπομπές CO₂ και των τοπικών ρύπων, καθώς και η καθαρή παρούσα αξία στο σύνολο του οικονομικού χρονικού ορίζοντα μειώνονται σημαντικά.

Λέξεις Κλειδιά: Πράσινη οροφή, ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά, οικονομοτεχνική ανάλυση, κτίριο γραφείων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι ευρέως αποδεκτό πως οι πιο ευημερούσες κοινωνίες παγκοσμίως είναι εκείνες των οποίων ο τριτογενής τομέας παρουσιάζει μια ισχυρή και συνεχώς αναπτυσσόμενη συνεισφορά στην ανάπτυξη της εθνικής οικονομίας. Τέτοιου είδους ανάπτυξη αναπόφευκτα αυξάνει το οικολογικό αποτύπωμα του συγκεκριμένου τομέα. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, για παράδειγμα, η κατανάλωση τελικής ενέργειας ακολουθεί καθοδική πορεία τα τελευταία χρόνια. Η συγκεκριμένη τάση οφείλεται κυρίως στη μείωση της κατανάλωσης τελικής ενέργειας στους τομείς της βιομηχανικής παραγωγής, των μεταφορών και των νοικοκυριών. Αντίθετα, ο τομέας των υπηρεσιών ακολουθεί διαφορετική πορεία, με την κατανάλωση ενέργειας να έχει αυξηθεί κατά 5,7% κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου [1].

Σε αντιστοιχία με την υφιστάμενη ευρωπαϊκή τάση, ο τριτογενής τομέας της Κύπρου καταναλώνει μερίδιο της τάξης του 14% της συνολικής εγχώριας κατανάλωσης, το οποίο είναι ελαφρώς μικρότερο από αυτό του οικιακού τομέα και εμφανώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του βιομηχανικού [2]. Στην Κύπρο, τα περισσότερα εμπορικά κτίρια βρίσκονται στις τέσσερις κύριες πόλεις (Λευκωσία, Λεμεσό, Λάρνακα και Πάφο), όπου εστιάζεται και η ανάλυση που ακολουθεί. Γενικά, οι πόλεις ευθύνονται για το 70% των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ και την αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, γεγονός που τις καθιστά κύριο παραγωγό αλλά και άμεσο θύμα της κλιματικής αλλαγής [3].

Για τη μετρίαση του περιβαλλοντικού και ενεργειακού αντικτύπου των πόλεων έχουν προταθεί και αναλυθεί μία πληθώρα τεχνολογιών στις οποίες, μεταξύ των άλλων, περιλαμβάνεται και η εγκατάσταση πράσινης οροφής και φωτοβολταϊκών συστημάτων ενσωματωμένων στο κτιριακό κέλυφος. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν είτε ως μέτρο ανακάλυψης του υπάρχοντος κτιρίου είτε ως τεχνική επιλογή κατά το σχεδιασμό νέων κτιρίων και να συμβάλουν στη βελτίωση τόσο της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης όσο και του μικροκλίματος του περιβάλλοντος χώρου.

Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, πρόσφατες μελέτες αξιολογούν, μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων, την επίδραση των πράσινων οροφών στην ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά κτιρίων και πόλεων. Ενδεικτικά, βάσει πειραματικής και αριθμητικής ανάλυσης, οι πράσινες οροφές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της χρήσης ενέργειας σε ένα κτίριο, η οποία κυμαίνεται από 20% για τις εκτατικού τύπου μέχρι 70% για τις εντατικού τύπου πράσινες οροφές [4]. Επίσης, οι Costanzo κ.α. [5] απέδειξαν ότι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας των πράσινων οροφών. Τέλος, οι Benilacqua κ.α. [6] αξιολογώντας αβαθείς πράσινες οροφές, τεκμηριώνουν πως η χωρική τους έκταση σε συνδυασμό με τη διάταξη βλάστησης αποτελούν καθοριστικό παράγοντα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

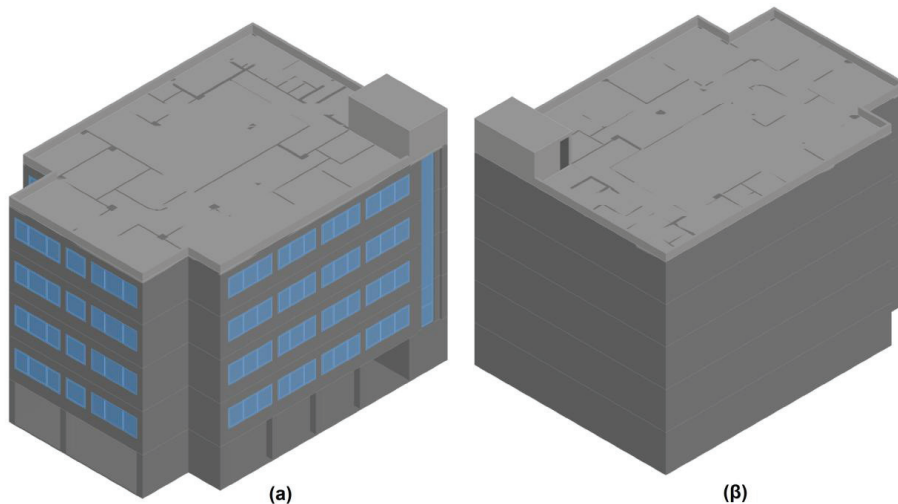
Έρευνες σχετικές με τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα (ΕΦΣ) στα κτίρια καταδεικνύουν ότι είναι ικανά να ικανοποιήσουν είτε μερικώς είτε πλήρως τις ενεργειακές τους ανάγκες [7]. Αυτά τα συστήματα αποτελούν μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στα κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, αξιοποιώντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, και διατηρούν παράλληλα το κόστος εγκατάστασης σε μεσαία επίπεδα [8]. Η υιοθέτηση της χρήσης ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και του συνδυασμού τους με επεμβάσεις βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας του κελύφους, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των κτιρίων [9].

Σε αυτή την εργασία, διερευνάται η συνδυασμένη εγκατάσταση πράσινης οροφής και ενσωματωμένου στο κτιριακό κέλυφος φωτοβολταϊκού συστήματος σε ένα τυπικό κτίριο γραφείων της Κύπρου. Ο σχεδιασμός της πράσινης οροφής έγινε με ενδημικά φυτά της Μεσογείου, συντηρητικά μοτίβα άρδευσης και χρήση ανακυκλώσιμων αστικών υλικών (τεμαχίδια καουτσούκ και κομποστοποιημένα απορρίμματα). Αντίστοιχα, το ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια υψηλής απόδοσης, τα οποία τοποθετούνται στη νότια και ανατολική όψη του κτιρίου. Η εργασία εστιάζει στην αποτίμηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού οφέλους που προκύπτει από τον εν λόγω σχεδιασμό και στη διερεύνηση της οικονομικής σκοπιμότητας των προτεινόμενων λύσεων, με τη διεξαγωγή ολοκληρωμένης οικονομοτεχνικής ανάλυσης που λαμβάνει υπόψη τα οικονομικά οφέλη από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO₂ και τοπικών ρύπων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Χαρακτηριστικά του κτιρίου

Το κτίριο γραφείων που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση είναι ένα κοινό τυπικό κτίριο της Κύπρου που ακολουθεί τις διαδεδομένες τακτικές σχεδιασμού και κατασκευής. Αποτελείται από 4 ορόφους και ισόγειο χώρο πωλητής. Η τυπική κάτοψη ορόφου είναι ορθογωνική, εμβαδού 365 m². Το κτίριο είναι πανταχόθεν ελεύθερο και ασκίαστο από παρακείμενες κατασκευές και φυσικά εμπόδια. Η τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου γραφείων παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Ισομετρική όψη του εξεταζόμενου κτιρίου γραφείων. Νοτιοδυτική όψη (α) και Βορειοανατολική όψη (β).

Η δόμηση των κτιρίων στην Κύπρο γίνεται με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, επίπεδες οροφές και τοιχοποιίες πλήρωσης που αποτελούνται από δικέλυφη ή μονοκέλυφη οπτοπλινθοδομή. Η θερμική μόνωση των κτιρίων συναντάται σε κτίρια κατασκευής μετά το 2007 και αποτελείται κυρίως από πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης τοποθετημένες στα οριζόντια και κάθετα στοιχεία του φέροντος οργανισμού και στις τοιχοποιίες. Αντιθέτως, στα κτίρια πρό του 2007 η τοποθέτηση θερμομόνωσης είναι ανύπαρκτη [10].

Στην ανάλυση που ακολουθεί εξετάζεται τόσο η αμόνωτη κατασκευή, όσο και η θερμικά μονωμένη, ώστε να διερευνηθούν πλήρως τα κυρίαρχα ισχύοντα χαρακτηριστικά του αποθέματος των κτιρίων γραφείων της Κύπρου. Για την πρώτη περίπτωση των κτιρίων χωρίς θερμική μόνωση, οι τιμές θερμοπερατότητας των οριζόντιων στοιχείων και των κατακόρυφων εξωτερικών στοιχείων του φέροντος οργανισμού και της εξωτερικής τοιχοποιίας είναι 3,28 W/(m²·K), 3,56 W/(m²·K) και 1,39 W/(m²·K) αντίστοιχα. Για τη δεύτερη περίπτωση, αυτή των θερμομονωμένων κτιρίων, οι τιμές αυτές ισούνται με 0,61 W/(m²·K), 0,62 W/(m²·K) και 0,52 W/(m²·K) αντίστοιχα. Επιπλέον, τα εξωτερικά ανοίγματα φέρουν πλαίσιο αλουμινίου με θερμοδιακοπή, με συντελεστή θερμοπερατότητας πλαισίου (U_f) ίσο με 2,98 W/(m²·K) και διπλό υαλοπίνακα με συντελεστή θερμοπερατότητας (U_g) ίσο με 2,8 W/(m²·K) σε όλες τις περιπτώσεις.

2.2. Στρωματογραφία πράσινης οροφής

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο εκτακός τύπος πράσινης οροφής με το πάχος του υποστρώματος ανάπτυξης των φυτών να μην ξεπερνά τα 15 cm. Η συγκεκριμένη τεχνολογική λύση έχει επιλεγεί ως μια υποσχόμενη δυνατότητα ανακαίνισης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των κτιρίων. Σε αυτή την κατεύθυνση, διερευνώνται 2 εναλλακτικά σενάρια διαμόρφωσης της πράσινης οροφής που βασίζονται στα διαθέσιμα εμπορικά υλικά. Η επιλογή των φυτών γίνεται με κύριο γνώμονα να προέρχονται από αυτόχθονα είδη προσαρμοσμένα στα ημιάνυδρα μεσογειακά κλιματικά χαρακτηριστικά. Πιο

συγκεκριμένα, οι επιλεγμένες φυτοκαλύψεις είναι οι ακόλουθες: α) *Sedum Sediforme*, ένα παχύφυτο με αυξημένη ικανότητα αντιμετώπισης έλλειψης νερού [11] και β) *Helichrysum Orientale L.*, ένα μεσογειακό αρωματικό ξηρόφυτο με πολλά περιβαλλοντικά οφέλη [12]. Και στις δυο περιπτώσεις, επιλέχθηκε ως υπόστρωμα ανάπτυξης μείγμα από ελαφρόπετρα (Ε), κομπόστ (Κ) και άμμο (Α) σε αναλογία 5Ε:1Κ:4Α (%) [13]. Το στρώμα αποστράγγισης αποτελείται από ανακυκλωμένα τεμάχια καουτσούκ που παρουσιάζουν παρόμοια δυνατότητα συγκράτησης νερού με τη φυσική ποζολάνη [14]. Για τις υπόλοιπες στρώσεις επιλέχθηκαν τα ακόλουθα υλικά: α) φίλτρο (Bauder FV 125), β) στοιχείο προστασίας (Bauder SV 300), γ) διαχωριστικό φύλλο (Bauder PE 02) και δ) αντιριζική αδιάβροχη μεμβράνη Bauder PLANT E.

2.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

Η εγκατάσταση ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος στις όψεις του κτιρίου έγινε με γνώμονα την αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας του κτιρίου. Ειδικότερα, στο κτίριο εγκαταστάθηκε σύστημα ονομαστικής ισχύος 51,6 kW_p το οποίο αποτελείται από μονοκρυσταλλικά πλαίσια κατασκευής της Hyundai τύπου HiS-S280RG, με ονομαστική ισχύ 280 W_p διαστάσεων 998 mm (Π) x 1640 mm (Μ) και μετατροπείς συχνότητας κατασκευής της Fronius [15].

2.4. Κλιματικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Η Κύπρος βρίσκεται σε βόρειο γεωγραφικό πλάτος 35° και ανατολικό γεωγραφικό μήκος 33° και το κλίμα της χαρακτηρίζεται από έντονα μεσογειακά χαρακτηριστικά. Ζεστά και ξηρά καλοκαίρια από τα μέσα Μαΐου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου και βροχεροί, αρκετά ευμετάβλητοι χειμώνες από το Νοέμβριο μέχρι τα μέσα Μαρτίου διαχωρίζονται από τις σύντομες εποχές της άνοιξης και του φθινοπώρου με γρήγορες μεταβολές των καιρικών συνθηκών [16]. Για τις εξεταζόμενες περιοχές, η πρωτεύουσα Λευκωσία παρουσιάζει το ψυχρότερο κλίμα μεταξύ των επιλεγμένων περιοχών και οι βαθμοημέρες θέρμανσης (HDD_{20/12}) ισούνται με 441 Kdays, σύμφωνα με τη μετεωρολογική βάση δεδομένων του Meteogram. Επιπλέον, η Λεμεσός που είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Κύπρου, είναι η θερμότερη περιοχή με βαθμοημέρες θέρμανσης 221 Kdays. Τέλος, η Λάρνακα και η Πάφος, με 340 Kdays και 223 Kdays αντίστοιχα, αντιπροσωπεύουν το ενδιάμεσο και θερμό κλίμα της νησιωτικής χώρας.

2.5. Παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης

2.5.1. Ζήτηση ενέργειας του κτιριακού κελύφους

Ο υπολογισμός της ζήτησης ενέργειας από το κτιριακό κέλυφος έγινε με τη χρήση του λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης EnergyPlus. Ο τυπικός όροφος του κτιρίου χωρίστηκε σε 16 ανεξάρτητες θερμικές ζώνες, έχοντας υπόψη τη χρήση κάθε χώρου και τον προσανατολισμό του. Δημιουργήθηκαν έτσι 65 συνολικά θερμικές ζώνες συμπεριλαμβανομένου και του κλιμακοστασίου. Ακολουθώντας τις συστάσεις της ASHRAE θεωρήθηκε η χρήση του κτιρίου σε πενήνήμερη εβδομαδιαία βάση μεταξύ των ωρών 07:00 και 17:00, μια χρονική περίοδος αντιπροσωπευτική της λειτουργίας των κτιρίων γραφείων στην Κύπρο. Οι επιθυμητές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτιρίου στις περιόδους θέρμανσης και ψύξης ορίστηκαν σε 22 °C και 25 °C αντίστοιχα [17,18]. Επίσης, ο ημερήσιος ρυθμός ανανέωσης του αέρα ορίστηκε σε 1,0 ach [17,18] και τα επίπεδα φωτισμού για τα γραφεία, την αίθουσα συνεδριάσεων και τους κοινόχρηστους χώρους σε 12 W/m², 14 W/m² και 6 W/m² αντίστοιχα [17, προσαρμογή από 18].

Για την προσομοίωση των πράσινων οροφών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Ecoroof [19], το οποίο είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό EnergyPlus. Πιο συγκεκριμένα, για το παχύφυτο *Sedum Sediforme* εξετάζεται η ακραία περίπτωση ολικής έλλειψης ποτίσματος, δεδομένου ότι έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι μπορεί να αντέξει σε ημιάνυδρες συνθήκες για περίπου 14 μήνες [11]. Για το αρωματικό ξηρόφυτο *Helichrysum Orientale L.*, το πότισμα εφαρμόζεται για 25 λεπτά κάθε τρίτη μέρα και η ποσότητα του ισούται με 3,30 l/h [12,20]. Ο Πίνακας 1 περιέχει τις υπόλοιπες παραμέτρους που λήφθηκαν υπόψη για την προσομοίωση της πράσινης οροφής.

Τέλος, εκτός από τα θερμοφυσικά και χωροταξικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών συστημάτων και το αποδεκτό επίπεδο άνεσης, απαραίτητο δεδομένο εισόδου για την ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου αποτελούν τα κλιματικά χαρακτηριστικά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τυπικά μετεωρολογικά έτη (TMY-2), τα οποία παρήχθησαν από τη μετεωρολογική βάση του Meteogram για τις επιλεγμένες πόλεις.

Πίνακας 1: Παράμετροι προσομοίωσης πράσινης οροφής

Στρώση	Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Πράσινη οροφή 1 (ΠΟ1) - <i>Helichrysum Orientale</i> L.		Πράσινη οροφή 2 (ΠΟ2) - <i>Sedum Sediforme</i>	
			Τιμή	Αναφορά	Τιμή	Αναφορά
Βλάστηση	Ύψος φυτών	m	0,15	[12]	0,25	[11]
	Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	-	3,50	[21]	1,75	[11]
	Ελάχιστη αντίσταση στομάτων	s/m	125,00	[22]	300,00	[23]
Υπό-στρωμα	Πάχος	m	0,075	[12]	0,15	[11]
	Αγωγιμότητα ξηρού εδάφους	W/(m·K)	0,20	[13]	0,20	[13]
	Πυκνότητα ξηρού εδάφους	Kg/m ³	1020,00	[13]	1020,00	[13]
	Ειδική θερμότητα ξηρού εδάφους	J/(kg·K)	1093,00	[13]	1093,00	[13]
	Θερμική απορρόφηση	-	0,96	[13]	0,96	[13]
	Ηλιακή απορρόφηση	-	0,85	[13]	0,83	[13]
	Ογκομετρική περιεκτικότητα σε υγρασία κορεσμού της επιφάνειας του εδάφους	-	0,26	[13]	0,13	[13]

2.5.2. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας θέρμανσης και ψύξης, εξοπλισμού και φωτισμού

Η ενεργειακή ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης και ψύξης στοχεύει στον υπολογισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τύπο καυσίμου ώστε να διατηρούνται οι επιθυμητές εσωτερικές συνθήκες άνεσης καθόλη τη διάρκεια του έτους. Για αυτό το σκοπό, επιλέχθηκε κεντρικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης με αντλία θερμότητας αέρα/ψυκτικού ρευστού, μεταβαλλόμενης ροής ψυκτικού μέσου (VRF), και εσωτερικές μονάδες ανεμιστήρα-στοιχείου. Η ηλεκτρική κατανάλωση του κτιρίου υπολογίστηκε σε ωριαία βάση, χρησιμοποιώντας κώδικα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε ειδικά για το σκοπό αυτό και βασίζεται: α) στις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό δυναμικής προσομοίωσης EnergyPlus, β) στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα που ανακτήθηκε από τα κλιματικά αρχεία του Meteorom και γ) στο συντελεστή απόδοσης (COP) ή στο βαθμό ενεργειακής απόδοσης (EER) της αντλίας θερμότητας, όπως αυτοί προκύπτουν από τα τεχνικά δελτία του κατασκευαστή σχετικά με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και την ισχύ λειτουργίας της αντλίας θερμότητας [24]. Από την προσομοίωση του κτιριακού κελύφους στο EnergyPlus προέκυψε η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού και λειτουργίας των συσκευών του κτιρίου.

2.5.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια

Ο υπολογισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μηνιαία βάση από το ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού PVsyst. Στην προσομοίωση λήφθηκαν υπόψη τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φωτοβολταϊκού πάνελου και των μετατροπέων συχνότητας, οι απώλειες της ηλεκτρικής καλωδίωσης και η αρχιτεκτονική διαμόρφωση του κτιρίου. Οι προσόψεις του κτιρίου που επιλέχθηκαν για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η νότια και η ανατολική, καθώς μετά από ανάλυση των διαθέσιμων επιλογών διαπιστώθηκε ότι η εγκατεστημένη σε αυτές ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος ικανοποιεί τις προϋποθέσεις για την

αδειοδοτήθη στο σχήμα της αυτοπαραγωγής, σύμφωνα με το υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο της ηλεκτροπαραγωγής που ισχύει την περίοδο αυτή (Νοέμβριος 2017) στην Κύπρο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

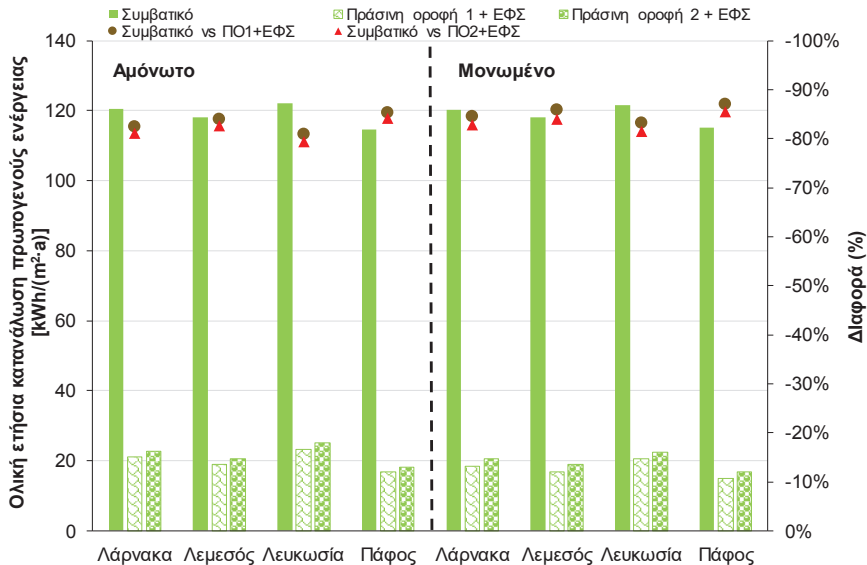
Η ανάλυση της συνδυασμένης εγκατάστασης πράσινης οροφής με ενσωματωμένο στο κέλυφος του κτιρίου φωτοβολταϊκού συστήματος σε τυπικό κτίριο γραφείων της Κύπρου, πραγματοποιήθηκε για τα ακόλουθα εναλλακτικά σενάρια: 1α) κτίριο χωρίς θερμομόνωση, 1β) κτίριο χωρίς θερμομόνωση με εγκατάσταση των 2 τύπων πράσινης οροφής και ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος, 2α) περιμετρικά θερμομονωμένο κτίριο (συμπεριλαμβανομένης της οροφής και της πυλωτής), 2β) περιμετρικά θερμομονωμένο κτίριο (συμπεριλαμβανομένης της οροφής και της πυλωτής) με εγκατάσταση των 2 τύπων πράσινης οροφής και ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.

3.1. Ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενεργειακή απόδοση του συνδυασμού των επιλεγμένων τεχνολογικών λύσεων αξιολογήθηκε συγκρίνοντας την ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά m^2 κλιματιζόμενη επιφάνεια για κάθε ένα από τα έξι εναλλακτικά σενάρια. Για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας (ΚΠΕ) χρησιμοποιήθηκε ο νομοθετημένος συντελεστής μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας (2,7) για το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της Κύπρου [25] σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$ΚΠΕ = 2,7 \cdot (ΚΗΕ_{\Theta, \Psi, \Sigma, E} - ΠΗΕ_{E\Phi\Sigma}) \quad (1)$$

Σε αυτή τη σχέση, ο όρος $ΚΗΕ_{\Theta, \Psi, \Sigma, E}$ ισούται με τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και λειτουργίας συσκευών και εξοπλισμού [$kWh/(m^2 \cdot a)$], ενώ ο όρος $ΠΗΕ_{E\Phi\Sigma}$ αντιστοιχεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα [$kWh/(m^2 \cdot a)$]. Οι συνδυασμένες τιμές που αφορούν τη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και η διαφορά μεταξύ της κάθε εξεταζόμενης αρχικής περίπτωσης και της αντίστοιχης εναλλακτικής παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



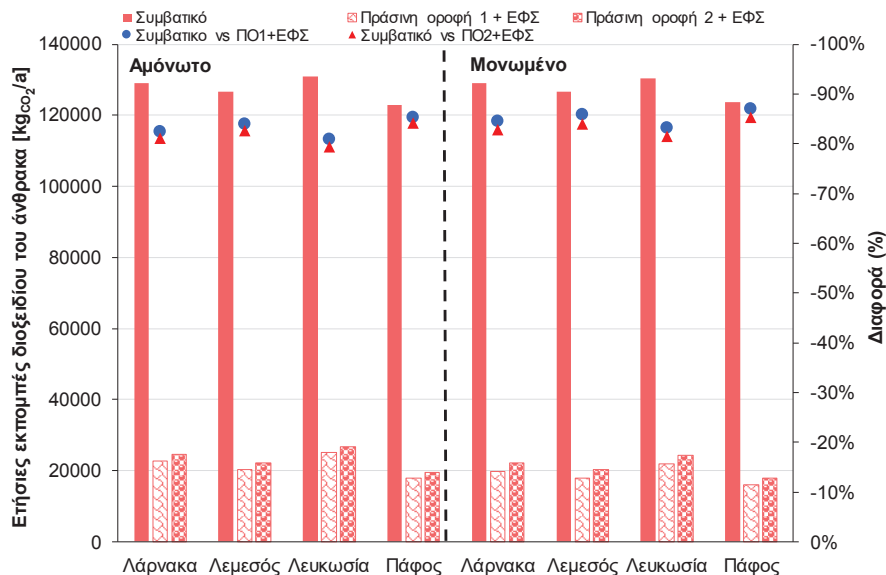
Εικόνα 2: Πρωτογενής ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του τυπικού κτιρίου γραφείων.

Με βάση τα αποτελέσματα της Εικόνας 2, προκύπτει πως η εγκατάσταση πράσινης οροφής σε συνδυασμό με ενσωματωμένο στο κέλυφος του κτιρίου φωτοβολταϊκού συστήματος επιφέρει σημαντική μείωση της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, σε όλες τις εξεταζόμενες

περιπτώσεις. Ειδικότερα για την περίπτωση του αμόνωτου κτιρίου ο συνδυασμός των τεχνολογικών λύσεων ενεργειακής αναβάθμισης που εξετάστηκαν επιφέρει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η οποία κυμαίνεται από 79,5% για την περίπτωση του συστήματος με παχύφυτη οροφή στην πόλη της Λευκωσίας, έως και 85,4% για την αντίστοιχη ξηρόφυτη οροφή στην πόλη της Πάφου. Αντίστοιχα στην περίπτωση του περιμετρικά μονωμένου κτιρίου η μείωση της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανέρχεται από 81,5% έως και 87% για τις περιπτώσεις των οροφών και των πόλεων που προαναφέρθηκαν.

3.2. Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της συνδυασμένης εφαρμογής των υπό διερεύνηση τεχνολογικών λύσεων, αξιολογήθηκε με τη σύγκριση των εκπομπών CO₂ και δυο τοπικών ρύπων (SO₂ και NO_x) μεταξύ της αρχικής κατάστασης, κτίριο χωρίς τα υπο αξιολόγηση συστήματα, και της τελικής κατάστασης, κτίριο με τα υπό αξιολόγηση συστήματα. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση στοχεύει στον υπολογισμό των έμμεσων εκπομπών από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και τη λειτουργία συσκευών και εξοπλισμού. Ο υπολογισμός της εκπνεόμενης ποσότητας CO₂ που παράγεται από τη λειτουργία του κτιρίου, πραγματοποιήθηκε με βάση το νομοθετημένο συντελεστή υπολογισμού εκπομπών για το ενεργειακό σύστημα της Κύπρου, που ισούται με 0,794 kg CO₂ ανά kWh πρωτογενούς ενέργειας [25]. Οι συντελεστές εκπομπής NO_x και SO₂ του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος της Κύπρου λήφθηκαν ίσοι με 1,29 t NO_x ανά GWh παραγόμενου ηλεκτρισμού και με 3,94 t SO₂ ανά GWh παραγόμενου ηλεκτρισμού, αντίστοιχα [26]. Σε αυτή την περίπτωση, η υπολογιζόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου ανάχθηκε αρχικά στην ισοδύναμη ποσότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση του συντελεστή απωλειών του συστήματος μεταφοράς και διανομής, ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 10,6% [27]. Στη συνέχεια, η υπολογιζόμενη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πολλαπλασιάστηκε με τους αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών NO_x και SO₂ ώστε να προκύψουν τελικά οι ετήσιες εκπομπές.



Εικόνα 3: Έμμεσες ετήσιες εκπομπές CO₂ που παράγονται από τη λειτουργία του τυπικού κτιρίου γραφείων.

Οι ετήσιες εκπομπές CO₂ παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. Παρατηρείται πως η τάση που διαμορφώνεται από αυτά τα αποτελέσματα καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή των ετησίων εκπομπών CO₂ βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση με αυτές της Εικόνας 2. Ειδικότερα η μείωση των εκπομπών CO₂ για το αμόνωτο κτίριο εμφανίζει τη μέγιστη τιμή (85,4%) στην περίπτωση της ξηρόφυτης πράσινης

οροφής στην πόλη της Πάφου και την ελάχιστη (79,5%) για την παχύφυτη πράσινη οροφή στην πόλη της Λευκωσίας. Στην περίπτωση του περιμετρικά μονωμένου κτιρίου η μέγιστη και ελάχιστη μείωση των εκπομπών CO₂ παρατηρείται στις ίδιες πόλεις και για τον ίδιο τύπου πράσινων οροφών με τα ποσοστά να είναι 87% και 81,5% αντίστοιχα.

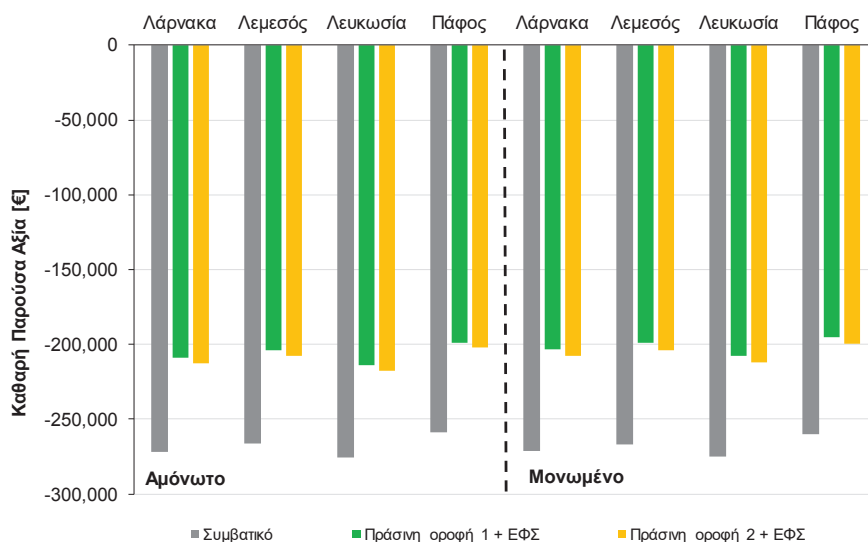
Για λόγους οικονομίας χώρου, οι εκπομπές NO_x και SO₂ επιλέχθηκε να μην παρουσιαστούν σε αντίστοιχο διάγραμμα. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνουν σε απόλυτα μεγέθη εκπομπές 85,8 kg NO_x και 261,9 kg SO₂ για τις περιπτώσεις του αρχικού αμόνωτου και περιμετρικά μονωμένου κτιρίου. Σε απόλυτη ταύτιση με τις ποσοστιαίες μειώσεις των εκπομπών CO₂ βρίσκονται και οι μειώσεις των εκπομπών NO_x και SO₂ στα εξετασθέντα σενάρια συνδυασμένης εγκατάστασης πράσινων οροφών και φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου στο κέλυφος του κτιρίου και για το λόγο αυτό η αναφορά των σχετικών ποσοστών παραλείπεται. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκπομπές των τοπικών ρύπων είναι εμφανώς μικρότερες συγκριτικά με αυτές του διοξειδίου του άνθρακα γεγονός που οφείλεται στα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου ενεργειακού μείγματος καυσίμου της ηλεκτροπαραγωγής στην Κύπρο (ελαφρύ/βαρύ πετρέλαιο, και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας).

3.3. Οικονομική αξιολόγηση

Η οικονομική ανάλυση του συνδυασμού των προτεινόμενων τεχνολογικών λύσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ) για κάθε εναλλακτικό σενάριο. Η αξιολόγηση είναι βασισμένη σε κοινωνική ανάλυση κόστους - οφέλους. Για το λόγο αυτό, εκτός από το κόστος ηλεκτρισμού, συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς και το περιβαλλοντικό κόστος λόγω των εκπομπών CO₂, NO_x και SO₂. Στον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας λήφθηκαν, επίσης, υπόψη το συνολικό κόστος εγκατάστασης των πράσινων οροφών και του ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος και τα αντίστοιχα κόστη συντήρησης.

Το κόστος εγκατάστασης των πράσινων οροφών λήφθηκε ίσο με 85 €/m² [28] και αντίστοιχα το κόστος εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος θεωρήθηκε ίσο με 1250 €/kW_p, σύμφωνα με στοιχεία της τοπικής αγοράς. Για τους σκοπούς της μελέτης, το ετήσιο κόστος συντήρησης των πράσινων οροφών και του φωτοβολταϊκού συστήματος θεωρήθηκε ίσο με 3,5% του αρχικού κόστους εγκατάστασης. Το κόστος ηλεκτρισμού θεωρήθηκε με βάση στις προβλέψεις των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας [29] που έχουν υιοθετηθεί από την Υπηρεσία Ενέργειας της Κυπριακής Δημοκρατίας, ενώ το κόστος ανά kg CO₂, NO_x και SO₂ λήφθηκε από τη διαθέσιμη διεθνή βιβλιογραφία, προσαρμοσμένο στις οικονομικές συνθήκες της Κύπρου και υποθέτοντας ότι αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων, σύμφωνα και με τις υποδείξεις που περιέχονται στη μελέτη των Zachariadis και Hadjikygiakou [26]. Στην αξιολόγηση θεωρήθηκε επίσης το κόστος χρέωσης της αυτοπαραγωγής ίσο με 32,07 €/MWh, σύμφωνα με τις τρέχουσες χρέωσεις (Νοέμβριος 2017).

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, το τέλος χρήσης δικτύου και το περιβαλλοντικό κόστος εκφράζονται σε ευρώ (€) και σε σταθερές τιμές του έτους 2015. Καθώς η αξιολόγηση αποσκοπεί σε ανάλυση με κοινωνική διάσταση (και όχι στη συμπεριφορά μεμονωμένων επενδυτών), χρησιμοποιήθηκε το κοινωνικό προεξοφλητικό επιτόκιο του 4%, σύμφωνα με τις συστάσεις των δημοσίων αρχών [30,31]. Τέλος, και προκειμένου η ανάλυση να συμβαδίζει με τις προτάσεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας, επιλέχθηκε ο οικονομικός χρονικός ορίζοντας των 20 ετών. Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης.



Εικόνα 4: Συγκριτική οικονομική αξιολόγηση μεταξύ συμβατικού και ενεργειακά αναβαθμισμένου κτιρίου βάσει της καθαρής παρούσας αξίας.

Από την Εικόνα 4 προκύπτει πως το συνολικό κόστος χρήσης αμόνωτου και μονωμένου κτιρίου γραφείων χωρίς την ενσωμάτωση σε αυτό πράσινης οροφής και φωτοβολταϊκού συστήματος είναι υψηλότερο σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Αντιθέτως, η λύση που εμφανίζει το χαμηλότερο συνολικό κόστος χρήσης είναι αυτή που συνδυάζει την εγκατάσταση ξηρόφυτης πράσινης οροφής και ενσωματωμένου στο κτιριακό κέλυφος φωτοβολταϊκού συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση η μείωση του συνολικού κόστους χρήσης κυμαίνεται από 59900 € μέχρι και 62800 € ή ισοδύναμα 23% για την περίπτωση του αμόνωτου κτιρίου στις περιοχές της Πάφου και της Λάρνακας αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, η ανάλυση για το μονωμένο κτίριο έδειξε πως το εν λόγω σύστημα μειώνει από 65.000 € έως 68400 € ή ισοδύναμα 25% το συνολικό κόστος χρήσης του κτιρίου στις περιοχές που προαναφέρθηκαν. Αντίστοιχη εικόνα με ελαφρώς αυξημένο συνολικό κόστος χρήσης παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης για την περίπτωση του συνδυασμένου συστήματος που περιλαμβάνει την παχύφυτη πράσινη οροφή σε σχέση με τη ξηρόφυτη. Ειδικότερα σε αυτή την περίπτωση η μείωση του συνολικού κόστους χρήσης κυμαίνεται από 56.700 € έως 59.000 € και από 61.000 € έως και 63.300 € για τις περιπτώσεις του αμόνωτου και μονωμένου κτιρίου αντίστοιχα. Αυτά τα αποτελέσματα ισοδυναμούν με μείωση του συνολικού κόστους χρήσης από 22% μέχρι και 23% σε σχέση με την αρχική κατάσταση του αμόνωτου και μονωμένου κτιρίου.

Τα αποτελέσματα της Εικόνας 4 σε συνδυασμό με την ανάλυση που προηγήθηκε καταδεικνύουν πως με καθαρά οικονομικούς όρους ο συνδυασμός της εγκατάστασης πράσινης οροφής με ενσωματωμένο στο κέλυφος φωτοβολταϊκό σύστημα δίδει ισχυρό οικονομικό κίνητρο για εφαρμογή των συνδυασμένων μέτρων που εξετάστηκαν. Αυτά τα αποτελέσματα αναμένεται να ενισχυθούν περαιτέρω στο εγγύς μέλλον καθώς το αρχικό κόστος εγκατάστασης των προτεινόμενων μέτρων εμφανίζει σταδιακή αποκλιμάκωση λόγω της σταδιακής τεχνολογικής ωριμότητας που επιτυγχάνεται στη γεωγραφική περιοχή της μελέτης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή προσφέρει μια περιεκτική αποτίμηση του συνδυασμού εγκατάστασης πράσινων οροφών και ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτίρια γραφείων στην Κύπρο. Εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές επιλογές ξηρόφυτης και παχύφυτης πράσινης οροφής και διαπιστώθηκε ότι σε συνδυασμό με την εγκατάσταση των ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού

συστήματος στην νότια και ανατολική πρόσοψη του κτιρίου προσφέρουν σημαντικά ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με τη συμβατική λύση. Η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας στην περίπτωση του κτιρίου γραφείων χωρίς θερμομόνωση κυμαίνεται μεταξύ 79,5% και 85,4%, με τις τιμές αυτές να είναι ελαφρώς υψηλότερες κατά 2% περίπου σε κτίρια με περιμετρική θερμική μόνωση. Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας οδηγεί σε αντίστοιχες μειώσεις των εκπομπών CO₂, NO_x και SO₂. Σε απόλυτες τιμές η μέγιστη μείωση των εν λόγω εκπομπών ανέρχεται σε 109,09 t CO₂, 73,43 kg NO_x και 223,63 kg SO₂. Τέλος, η οικονομική αξιολόγηση έδειξε ότι η αξιοποίηση της τεχνολογίας των πράσινων οροφών σε συνδυασμό με αυτή των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι οικονομικά αποδοτική και οδηγεί σε μείωση της καθαρής παρούσας αξίας του συνολικού κόστους χρήσης σε 20ετή χρονικό ορίζοντα που σε απόλυτες τιμές κυμαίνεται από 56700 € έως και 68400 €, ανάλογα με το είδος φύτευσης την πράσινης οροφής που θα επιλεγεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EEA. European Environment Agency, Final energy consumption by sector and fuel, (2015). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment> (accessed September 20, 2016).
- [2] IEA. International Energy Agency, Statistics-Energy Balances, (2014). <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=Cyprus&product=balances> (accessed September 10, 2016).
- [3] J. Rigter, D. Saygin, G. Kieffer, Renewable energy in cities, (2016). <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=3748>.
- [4] C.M. Silva, M.G. Gomes, M. Silva, Green roofs energy performance in Mediterranean climate, *Energy Build.* 116 (2016) 318–325. doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.012.
- [5] V. Costanzo, G. Evola, L. Marletta, Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs, *Energy Build.* 114 (2016) 247–255. doi:10.1016/j.enbuild.2015.04.053.
- [6] P. Bevilacqua, J. Coma, G. Pérez, C. Chocarro, A. Juárez, C. Solé, M. De Simone, L.F. Cabeza, Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs, *Build. Environ.* 92 (2015) 305–316. doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.026.
- [7] M. Debbarma, K. Sudhakar, P. Baredar, Thermal modeling, exergy analysis, performance of BIPV and BIPVT: A review, *Renew. Sustain. Energy Debbarma, M., Sudhakar, K., Baredar, P., 2017. Therm. Model. Exergy Anal. Perform. BIPV BIPVT A Rev. Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 1276–1288. doi:10.1016/j.rser.2017.02.035 Rev. 73 (2017) 1276–1288. doi:10.1016/j.rser.2017.02.035.
- [8] X. Cao, X. Dai, J. Liu, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128 (2016) 198–213. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [9] D.A. Chwieduk, Towards modern options of energy conservation in buildings, *Renew. Energy.* 101 (2017) 1194–1202. doi:10.1016/j.renene.2016.09.061.
- [10] Κυπριακή Στατιστική Υπηρεσία, Στατιστικές κατασκευών και στέγασης (2013), 2015. [http://www.mof.gov.cy/mof/cystat/statistics.nsf/All/0D72BBE5DB95CBDCC22580C90036517F/\\$file/CONSTRUCTION_AND_HOUSING-2013-190315.pdf?OpenElement](http://www.mof.gov.cy/mof/cystat/statistics.nsf/All/0D72BBE5DB95CBDCC22580C90036517F/$file/CONSTRUCTION_AND_HOUSING-2013-190315.pdf?OpenElement).
- [11] P.A. Nektarios, N. Ntoulas, E. Nydrioti, I. Kokkinou, E.M. Bali, I. Amountzias, Drought stress response of *Sedum sediforme* grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths, *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 181 (2014) 52–61. doi:10.1016/j.scienta.2014.10.047.
- [12] M. Papafotiou, N. Pergialioti, L. Tassoula, I. Massas, G. Kargas, Growth of native aromatic xerophytes in an extensive Mediterranean green roof as affected by substrate type and depth and irrigation frequency, *HortScience*. 48 (2013) 1327–1333.

- [13] D.J. Sailor, D. Hutchinson, L. Bokovoy, Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S., *Energy Build.* 40 (2008) 1246–1251. doi:10.1016/j.enbuild.2007.11.004.
- [14] G. Pérez, A. Vila, L. Rincón, C. Solé, L.F. Cabeza, Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material, *Appl. Energy.* 97 (2012) 347–354. doi:10.1016/j.apenergy.2011.11.051.
- [15] Hyundai, Hyundai Solar Module, 2017. www.hyundaisolar.com.
- [16] Κυπριακή Δημοκρατία. Τμήμα Μετεωρολογίας, Το κλίμα της Κύπρου, (2017). http://www.moa.gov.cy/moa/ms/ms.nsf/DMLcyclimate_gr/DMLcyclimate_gr?OpenDocument (accessed September 12, 2017).
- [17] ASHRAE. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2013 ASHRAE handbook: Fundamentals, Atlanta, GA, 2013.
- [18] CEN. European Committee for Standardization, EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2007.
- [19] D.J. Sailor, A green roof model for building energy simulation programs, *Energy Build.* 40 (2008) 1466–1478. doi:10.1016/j.enbuild.2008.02.001.
- [20] C. Van Mechelen, T. Dutoit, M. Hermy, Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review, *Sustain. Cities Soc.* 19 (2015) 74–90. doi:10.1016/j.scs.2015.07.007.
- [21] G. Varras, K.-T. Vozikis, C. Myriounis, I.L. Tsirogiannis, E. Kitta, Design of Extensive Green Roofs for the Major School Plants of Piraeus, *Acta Hortic.* 1099 (2015) 959–966. doi:10.17660/ActaHortic.2015.1099.122.
- [22] I. Kokkinou, N. Ntoulas, P.A. Nektarios, D. Varela, Response of native aromatic and medicinal plant species to water stress on adaptive green roof systems, *HortScience.* 51 (2016) 608–614.
- [23] P.C. Tabares-Velasco, J. Srebric, A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, *Build. Environ.* 49 (2012) 310–323. doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.019.
- [24] Daikin, Air Conditioning, Technical Data: VRV IV Heat Pump, 2013.
- [25] Υπουργείο Ενέργειας Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού, Κ.Δ.Π. 33/2015. Ο περί ρύθμισης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων νόμος (Μεθοδολογία), 2015.
- [26] T. Zachariadis, C. Hadjikyriakou, *Social Costs and Benefits of Renewable Electricity Generation in Cyprus*, Springer International Publishing, Cham, 2016. doi:10.1007/978-3-319-31535-5.
- [27] Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου, Ετήσια Έκθεση 2015, 2015. <https://www.eac.com.cy/EN/EAC/FinancialInformation/Documents/Annual Report-English 2015-FINAL.pdf>.
- [28] kartECO, Τηλεφωνική επικοινωνία με αντιπρόσωπο της εταιρείας, (2017).
- [29] T. Zachariadis, P. Hadjinicolaou, The effect of climate change on electricity needs - A case study from Mediterranean Europe, *Energy.* 76 (2014) 899–910. doi:10.1016/j.energy.2014.09.001.
- [30] HM Treasury, *The Green Book : Appraisal and Evaluation in Central Government*, in: London, UK, 2003. http://www.hm-treasury.gov.uk/d/green_book_complete.pdf.
- [31] J. Steinbach, D. Staniaszek, Discount rates in energy system analysis. Discussion Paper, Buildings Performance Institute Europe and Fraunhofer Institute, May 2015, 2015. http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/142/Discount_rates_in_energy_system-discussion_paper_2015_ISI_BPIE.pdf.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΟΝΟΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Α. Σερασιδου, Ε. Πετούσης, Γ. Μαρτινόπουλος*

Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας, Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος,
57001 Θεσσαλονίκη, e-mail: g.martinopoulos@ihu.edu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας του σύγχρονου ανθρώπου, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων όμως, απέχει πολύ από το να είναι ικανοποιητική, καθιστώντας τα έναν από τους πιο σημαντικούς ρυπαντές και καταναλωτές ενέργειας. Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιριακού τομέα και η εισαγωγή των κτιρίων σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (nZEB) μετά το 2020, με παράλληλες επεμβάσεις για τη βελτίωση και του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος με ιδιαίτερη έμφαση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, επιτόπου ή κοντά στα κτίρια.

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι δυνατότητες για ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων της ευρύτερης περιοχής της Βορείου Ελλάδος, μέσα από ανάλυση προτεινόμενων επεμβάσεων σε ένα τυπικό δείγμα κτιρίου υφιστάμενης μονοκατοικίας στο Ωραιόκαστρο Θεσσαλονίκης. Διερευνώνται τρόποι μετατροπής της κατοικίας σε κτίριο σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης μέσω της αρμονικής ενσωμάτωσης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο κέλυφος του κτιρίου για την κάλυψη ενός μεγάλου μέρους των απαιτήσεων για θέρμανση, Ζεστό Νερό Χρήσης (ΖΝΧ) και ηλεκτρισμό. Επιπρόσθετα μελετάται, κατά πόσο οι επεμβάσεις αυτές είναι μια βιώσιμη οικονομικά επένδυση σε κτίρια τα οποία δεν έχουν δομηθεί ικανοποιώντας τις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως αυτές του ΚΕΝΑΚ, με γνώμονα παράλληλα και την αισθητική τους αναβάθμιση.

Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται η ενσωμάτωση ενός σύγχρονου συστήματος περσιδών οι οποίες ενσωματώνουν φωτοβολταϊκά, μπροστά από τα διαφανή δομικά στοιχεία, στις όψεις με νοτιοδυτικό και νοτιοανατολικό προσανατολισμό, που συνδυάζουν σκίαση της κατοικίας και επομένως την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων, με παράλληλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, διερευνάται η χρήση των υφιστάμενων ηλιακών θερμικών συλλεκτών στο δώμα του κτιρίου για την κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ και υποβοήθηση της θέρμανσης, που θα πραγματοποιείται με αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος σε λέβητα φυσικού αερίου.

Λέξεις Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά Ενσωματωμένα σε κτίρια (BIPV), Ενεργειακή Απόδοση, NZEB, Περίσδες Σκίασης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος στη σύγχρονη εποχή δραστηριοποιείται σχεδόν αποκλειστικά μέσα στο δομημένο περιβάλλον. Υπολογίζεται ότι οι άνθρωποι σήμερα περνούν περισσότερο από το 80% της ζωής τους στην κατοικία ή το κτίριο στο οποίο εργάζονται [1]. Ο κτιριακός τομέας αποτελεί, επομένως, αναπόσπαστο κομμάτι κάθε έκφρασης της καθημερινότητας του σύγχρονου πολιτισμού, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Παρόλη τη σημασία του, όμως, και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει στο άτομο και το κοινωνικό σύνολο, η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων απέχει πολύ από το να είναι ικανοποιητική, καθιστώντας τα έναν από τους πιο σημαντικούς ρυπαντές και καταναλωτές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ο κτιριακός τομέας ευθύνεται περίπου για το 40% της χρήσης τελικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και για το 40% των εκπομπών CO₂ [2].

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, έχει τεθεί ως στόχος από την ΕΕ η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιριακού τομέα. Σύμφωνα με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ [2] του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, όλα τα νέα δημόσια κτίρια θα πρέπει να είναι κτίρια σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (nZEB) από το 2019. Το ίδιο ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα νέα κτίρια από το 2020 και έπειτα, ενώ παρεμβάσεις πρέπει να γίνουν και στο υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα. Ως κτίρια σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης ορίζονται, σύμφωνα με το άρθρο 2 της Οδηγίας, τα κτίρια με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση [2]. Η απόδοση αυτή αξιολογείται με βάση την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ). Η ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται θα πρέπει να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, επιτόπου ή κοντά στο κτίριο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει αν η ενεργειακή αναβάθμιση στην πλειοψηφία των υφιστάμενων κτιρίων της ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής της Βορείου Ελλάδας, τα οποία δεν έχουν δομηθεί ικανοποιώντας σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως αυτές του ΚΕΝΑΚ, είναι μια βιώσιμη ενεργειακά και οικονομικά επένδυση. Συγκεκριμένα, μελετάται η ενεργειακή απόδοση ενός τυπικού δείγματος κτιρίου υφιστάμενης μονοκατοικίας στη βόρεια Ελλάδα. Εξετάζεται η δυνατότητα μετατροπής της σε κτίριο σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης μέσω μιας αρμονικής ενσωμάτωσης συστημάτων ΑΠΕ στο κέλυφος του κτιρίου για την κάλυψη ενός μεγάλου μέρους των απαιτήσεών του σε θέρμανση, Ζεστό Νερό Χρήσης (ΖΝΧ) και ηλεκτρισμό, με γνώμονα παράλληλα και την αισθητική αναβάθμιση του κτιρίου.

Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ ορίζει ότι κάθε κράτος-μέλος οφείλει να θεσπίσει δικές του ελάχιστες απαιτήσεις για να θεωρηθεί ένα κτίριο ως κτίριο σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης, πάντοτε συνεκτιμώντας τις κλιματολογικές συνθήκες, την προβλεπόμενη χρήση και την οικονομική αποδοτικότητα των επεμβάσεων για τη διάρκεια ζωής του εκάστοτε κτιρίου. Αν και στην Ελλάδα δεν έχει θεσπιστεί ακόμη η σχετική νομοθεσία που να ορίζει τις απαιτήσεις για την πιστοποίηση ενός κτιρίου ως κτίριο σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης, υπάρχει μεγάλο κτιριακό απόθεμα το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει βάση παρεμβάσεων για την μείωση του ενεργειακού τους αποτυπώματος. Στην παρούσα εργασία διερευνάται η μετατροπή μια υφιστάμενης μονοκατοικίας, η οποία κατασκευάστηκε το 1992, ώστε να καλυφθεί το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων από ανανεώσιμες πηγές και να θεωρηθεί το κτίριο ως κτίριο Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης, ενώ υπολογίζεται και ο χρόνος αποπληρωμής της όλης επένδυσης.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

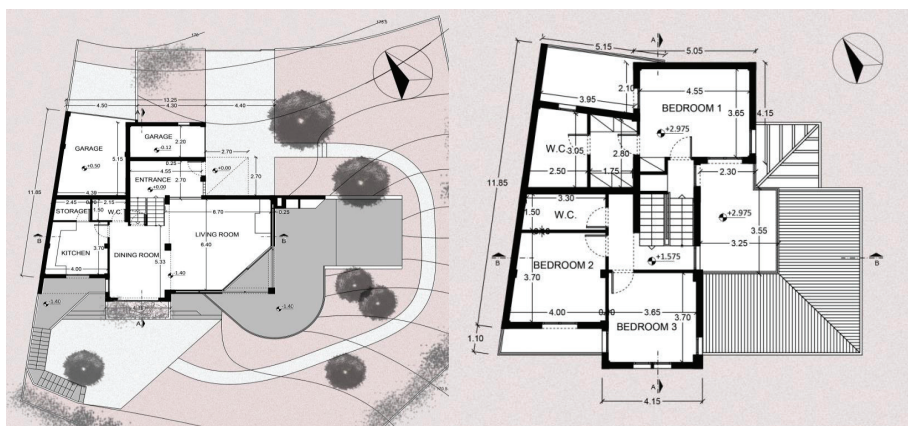
2.1. Υφιστάμενη κατάσταση

Το κτίριο που μελετάται είναι μια μονοκατοικία κατασκευασμένη το 1992 (σύμφωνα με τον τότε ισχύοντα Γενικό Οικοδομικό Κανονισμό [3]), η οποία βρίσκεται στο Ωραιόκαστρο Θεσσαλονίκης και κατοικείται από μια τετραμελή οικογένεια. Η κατοικία είναι σε επαφή με γειτονικό κτίριο στη νοτιοδυτική της πλευρά, ενώ είναι ελεύθερη στις υπόλοιπες τρεις όψεις της. Το κτίριο αποτελείται από δύο θερμαινόμενους ορόφους, με συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια 196,5 m², ενώ ο συνολικός όγκος του κτιρίου είναι 646,9 m³. Το κτίριο διαθέτει και υπόγειο, μη θερμαινόμενο χώρο επιφάνειας 101,9 m². Η κάτοψη των δύο επιπέδων της κατοικίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.

Εξαιτίας της μεγάλης κλίσης του οικοπέδου, στο οποίο υπάρχει υψομετρική διαφορά περίπου 7 μέτρων στον άξονα Βορά – Νότου, το ισόγειο μετατρέπεται στην πραγματικότητα σε πρώτο όροφο στη νότια όψη του κτιρίου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Ο τρόπος έδρασης του κτιρίου στο οικόπεδο

περιορίζει, έτσι, τις θερμικές απώλειες προς το έδαφος. Τα υλικά κατασκευής είναι τα τυπικά υλικά δόμησης στην Ελλάδα. Ο φέρων οργανισμός είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και τα στοιχεία πλήρωσης από μπιακή τοιχοποιία με τούβλα και ενδιάμεση μόνωση. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι συντελεστές θερμοπερατότητας (U) των βασικών δομικών στοιχείων του κτιρίου.

<i>Πίνακας 1: Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων</i>	
Δομικά στοιχεία	U (W/m²K)
Μπιακή τοιχοποιία με ενδιάμεση μόνωση	0,415
Μαρμάρινο δάπεδο με μόνωση και πλάκα σκυροδέματος	0,363
Δώμα	0,271
Στέγη	0,375
Πόρτες / Παράθυρα	2,6



Εικόνα 1: Κάτοψη ισογείου (αριστερά), Κάτοψη ορόφου (δεξιά)



Εικόνα 2: Νοτιοδυτική όψη

2.2. Συστήματα Θέρμανσης – Αερισμού – Κλιματισμού

Στην υφιστάμενη κατάσταση, η θέρμανση της κατοικίας επιτυγχάνεται με τη χρήση λέβητα πετρελαίου, ονομαστικής ισχύος 20 kW και απόδοσης 77% ο οποίος έχει τη δυνατότητα μετατροπής για καύση και

φυσικού αερίου. Οι χώροι θερμαίνονται μέσω ενδοδαπέδιου συστήματος διανομής της θερμότητας από πλαστικές σωληνώσεις, το οποίο λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (40°C - 45°C).

Για την κάλυψη των απαιτήσεων ψύξης χρησιμοποιούνται τρεις κλιματιστικές μονάδες διαιρούμενου τύπου, τοποθετημένες σε δύο από τα υπνοδωμάτια του ορόφου και στο χώρο του καθιστικού στο ισόγειο. Οι μονάδες των υπνοδωματίων έχουν ονομαστική ισχύ 1 kW και συντελεστή απόδοσης (EER) 2,4, ενώ αυτή του ισογείου έχει ονομαστική ισχύ 4,60 kW και απόδοση EER 3,4. Οι ανάγκες σε ZNX καλύπτονται με τη χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, συνολικής επιφάνειας 9,6 m² ενώ υπάρχει και η δυνατότητα υποβοήθησης από το σύστημα θέρμανσης.

2.3. Ενεργειακό προφίλ του κτιρίου

Το ενεργειακό προφίλ του υφιστάμενου κτιρίου μελετάται με βάση την ετήσια κατανάλωση τελικής ενέργειας και την ενεργειακή απαίτηση για τις διάφορες χρήσεις με τη βοήθεια του λογισμικού TEE-KENAK. Το λογισμικό αυτό εφαρμόζει τους απαραίτητους αλγόριθμους για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων στην Ελλάδα, βασίζόμενο στην μεθοδολογία Ευρωπαϊκών προτύπων (ΕΛΟΤ EN ISO 13790, κ.α.) καθώς και στα σχετικά εθνικά πρότυπα [4]. Με δεδομένα τα γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτηριακού κελύφους, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των απαραίτητων Η/Μ εγκαταστάσεων υπολογίζεται η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Τα κλιματικά και περιβαλλοντικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργειακή μελέτη του κτιρίου βασίστηκαν στην Τεχνική Οδηγία του Τ.Ε.Ε. «Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010» [5]. Η εσωτερική θερμοκρασία αναφοράς για τους χειμερινούς μήνες είναι 20°C για όλους τους χώρους κύριας χρήσης και 24°C για τα W.C. Η αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς για τους θερινούς μήνες είναι 25°C. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά τους υπολογισμούς, με βάση τον Ελληνικό κανονισμό για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων [6], και την πραγματική κατανάλωση των ενοίκων, με βάση τους λογαριασμούς του ηλεκτρικού ρεύματος της κατοικίας για τη χρονική περίοδο 2013–2015, δίνονται παρακάτω:

- Θέρμανση: 9.854 kWh
- Ηλεκτρισμός: 6.500 kWh
- Ζεστό νερό χρήσης: 2.485 kWh

Αξίζει να σημειωθεί ότι, καθώς οι ανάγκες του κτιρίου για ψύξη καλύπτονται από τις κλιματιστικές μονάδες, η τελική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη περιλαμβάνεται στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά νοικοκυριό στη χώρα κυμαίνεται στα 3.750 kWh [7], προκύπτει ψυκτικό φορτίο της τάξης των 2.750 kWh. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση που πρέπει να καλυφθεί είναι, επομένως, 18.839 kWh.

3. ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Για να αναβαθμιστεί ενεργειακά το κτίριο και να μετατραπεί σε κτίριο nZEB κάθε κατηγορία κατανάλωσης ενέργειας αντιμετωπίστηκε ξεχωριστά, δίνοντας έμφαση στο να βρεθεί η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση λύση. Η λογική που ακολουθήθηκε ήταν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εκάστοτε ενεργειακή απαίτηση. Για το λόγο αυτό η παρέμβαση αποτελείται από τρία μέρη:

- α) την μετατροπή του συστήματος θέρμανσης σε λέβητα φυσικού αερίου, για την κάλυψη των απαιτήσεων θέρμανσης,
- β) την εγκατάσταση ενός συστήματος εξωτερικών περισίδων με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών και τέλος,
- γ) την αξιοποίηση του υφιστάμενου ηλιακού συστήματος για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX.

3.1. Σύστημα θέρμανσης φυσικού αερίου

Για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης υιοθετήθηκε η μετατροπή του υφιστάμενου συστήματος πετρελαίου σε λέβητα καύσης φυσικού αερίου παράλληλα με την εγκατάσταση κυκλοφορητών με μεταβλητές στροφές ανά λεπτό, που επιτρέπουν στον λέβητα να λειτουργεί με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο αέρα τροφοδοσίας και να μεγιστοποιεί την απόδοση καύσης.

Ο λέβητας με τον τρόπο αυτό θα έχει απόδοση που μπορεί να φτάσει έως και 108% και μπορεί να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος χωρητικότητας, που κυμαίνεται από 3,4 έως 20 kW, καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου [8]. Ο λέβητας μπορεί να λειτουργεί και με μερικό φορτίο, ανάλογα με την ενεργειακή απαίτηση, χωρίς να μειώνεται σημαντικά ο συντελεστής απόδοσής του. Με αυτό τον τρόπο τα θερμικά φορτία μπορούν να καλύπτονται κάθε στιγμή με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση καυσίμου, βελτιώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου. Το κόστος της αρχικής επένδυσης για την μετατροπή του λέβητα ανέρχεται σε 600€.

3.2. Σύστημα σκίασης με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά

Ένα σημαντικό κομμάτι της ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου είναι η εγκατάσταση συστήματος κινητών εξωτερικών περισίδων σκίασης σε ορισμένα από τα παράθυρα και ανοίγματα της νοτιοανατολικής και νοτιοδυτικής πρόσοψης με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά πάνελ. Το σύστημα σκίασης προσφέρει τη δυνατότητα περιστροφής των περισίδων στον κατακόρυφο άξονά τους, με βάση την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και την εναλλαγή των εποχών. Οι περισίδες θα είναι συνδεδεμένες με σύστημα ελέγχου της κίνησης, που επιτρέπει τόσο την καλύτερη δυνατή σκίαση του εσωτερικού χώρου όσο και τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το κινητό αυτό σύστημα σκίασης βελτιστοποιεί τις ροές της θερμότητας και φωτός σε σχέση με σταθερά συστήματα σκίασης καθώς οι περισίδες είναι προγραμματισμένες να ακολουθούν την πορεία του ήλιου και επομένως τα επίπεδα φυσικού φωτός στο εσωτερικό μειοδοποιούνται, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούνται τα θερμικά κέρδη. Οι πιθανότητες για υπερβολική σκίαση ή λιγοστή σκίαση, που προκύπτουν συχνά σε διάφορα διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας στα σταθερά συστήματα σκίασης, περιορίζονται σημαντικά, καθώς οι περισίδες βρίσκονται πάντα στην ιδεατή θέση με βάση τη θέση του ήλιου [9]. Ταυτόχρονα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που ενσωματώνουν στην εξωτερική τους όψη θα παράγουν και τον απαιτούμενο ηλεκτρισμό.



Εικόνα 3: Αποψη της νοτιοδυτικής όψης με τα συστήματα περισίδων

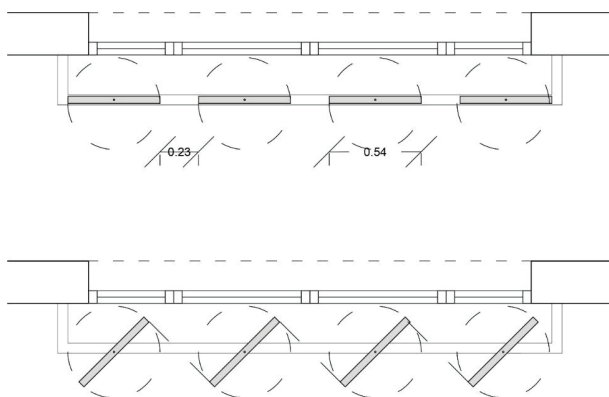
Οι εξωτερικές περισίδες τοποθετούνται με πολύ μικρή επέμβαση για την εγκατάσταση του μεταλλικού σκελετού στήριξής τους, εξωτερικά στο κέλυφος του κτιρίου, προσφέροντας μια αρχιτεκτονική και αισθητική αναβάθμιση στις προσόψεις του. Συνεισφέρουν, στη μείωση των ενεργειακών αναγκών για ψύξη έως και 55-60% ετησίως για νότιους προσανατολισμούς, καθώς και στη μείωση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση περίπου 10%, σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Σκίασης [10]. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις Ευρωπαϊκές πρωτεύουσες, και προέκυψε μείωση έως 70% στις ανάγκες ψύξης και έως 35% στις ανάγκες θέρμανσης στη Ρώμη, η οποία έχει κλιματικές συνθήκες που προσομοιάζουν σε αυτές της Θεσσαλονίκης, λόγω του μεσογειακού κλίματος με τους υγρούς χειμώνες και τα ζεστά, ξηρά καλοκαίρια.

Για την πλήρη κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετούνται φωτοβολταϊκά πάνελ εκτός από τις περισίδες και σε τμήμα της στέγης του κτιρίου.

3.2.1. Φωτοβολταϊκά πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που ενσωματώνονται στις περσίδες της νοτιοανατολικής και νοτιοδυτικής όψης καλύπτουν συνολικά επιφάνεια περί τα 32 m², με τα 24 m² να αφορούν την επιφάνεια μετατροπής. Συγκεκριμένα, 17,60 m² στην νοτιοδυτική όψη και 6,40 m² στη νοτιοανατολική.

Κάθε τμήμα αποτελείται από κατακόρυφες περσίδες, πλάτους 54 cm. Το πλήθος των περσίδων και το μήκος τους ποικίλει ανάλογα με τη γεωμετρία κάθε ανοίγματος. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικές περσίδες είναι 23 cm ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα αλληλοσκίασης των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 6). Παράλληλα, η απόσταση ανάμεσα στις περσίδες, σε συνδυασμό και με το κενό των 30 cm ανάμεσα σε αυτές και το εκάστοτε άνοιγμα, επιτρέπουν την ανεμπόδιστη ροή του αέρα, δρώντας έτσι βοηθητικά και για την αποβολή της επιπλέον θερμότητας που δημιουργείται από τη λειτουργία των ΦΒ, ώστε να αποφεύγεται η πιθανή υπερθέρμανση των όψεων κατά τους θερινούς μήνες.



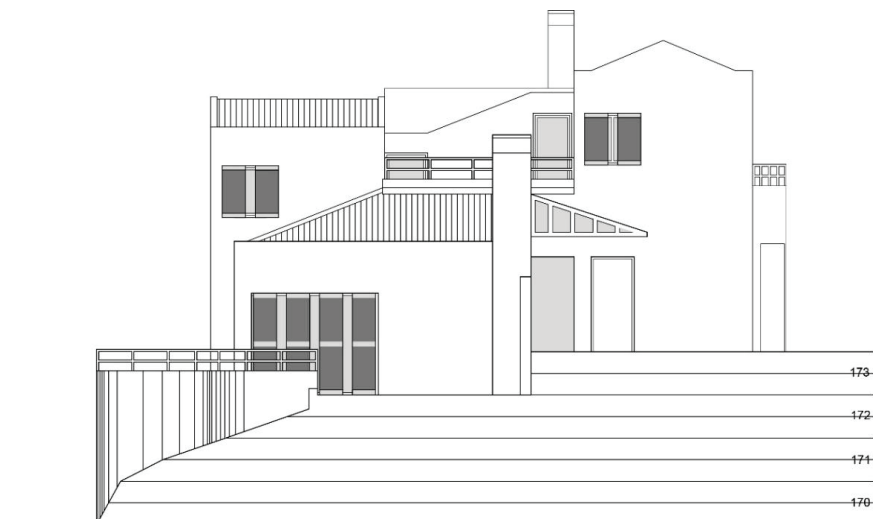
Εικόνα 6: Λεπτομέρεια της εγκατάστασης των περσίδων στις όψεις (πάνω: πλήρως κλειστές, κάτω: μερικώς κλειστές, καθόλου αλληλοσκίαση)

Η νοτιοδυτική όψη διαθέτει μια σειρά από 33 πάνελ, τοποθετημένα σε 4 ανοίγματα (Εικόνα 7). Ο άξονας ανίχνευσης της πορείας του ήλιου είναι ίσος με το αζιμούθιο (*azimuth axis for tracking*), ενώ τα πάνελ έχουν κατακόρυφη κλίση στις 90° και αζιμούθιο στις 217° (με το Βορρά στις 0°) όταν οι περσίδες είναι εντελώς κλειστές.



Εικόνα 7: Αποψη της εγκατάστασης των ΦΒ περσίδων στη νοτιοδυτική όψη

Η νοτιοανατολική όψη διαθέτει μια παρόμοια σειρά από 12 πάνελ, τοποθετημένα σε 3 από τα ανοίγματά της (Εικόνα 8). Ο άξονας ανίχνευσης της πορείας του ήλιου είναι και εδώ ίσος με το αζιμούθιο, και τα πάνελ έχουν κατακόρυφη κλίση στις 90° και αζιμούθιο στις 127° όταν οι περισίδες είναι εντελώς κλειστές.



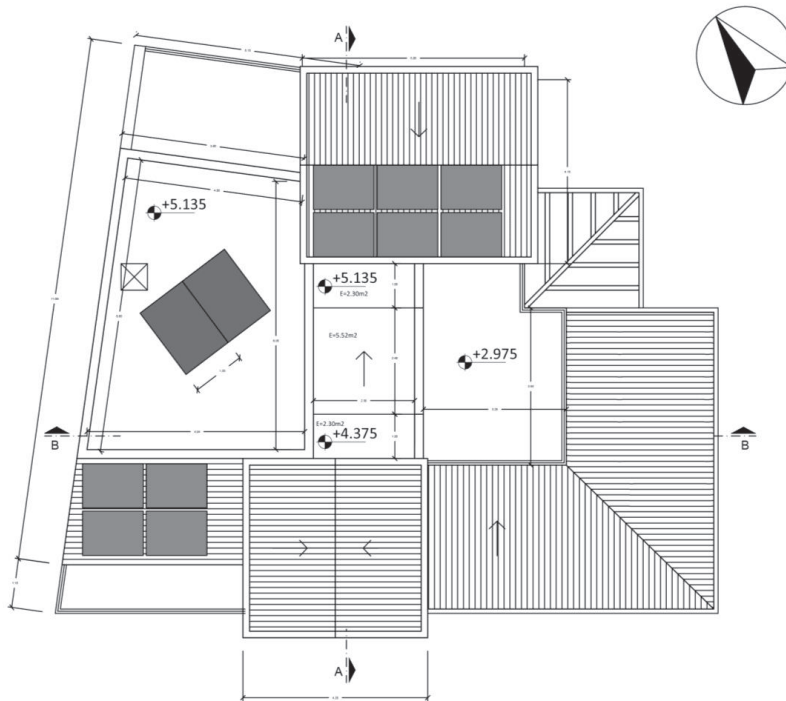
Εικόνα 8: Άποψη της εγκατάστασης των ΦΒ περισίδων στη νοτιοανατολική όψη

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ενσωματωμένα στις εξωτερικές περισίδες, έτσι το πλήθος των πάνελ που θα τοποθετηθεί σε κάθε περισίδα εξαρτάται από την εκάστοτε διάστασή της. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 [11].

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ		
	Πολυκρυσταλλικά πάνελ περισίδων	Μονοκρυσταλλικά πάνελ δώματος
Μέγιστη Ισχύς (Pmax)	75Wp	240Wp
Μέγιστη Τάση (Vmpp)	9,35V	28,92V
Μέγιστη Ένταση (Impp)	8,04A	8,47A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc)	11,19V	34,43V
Ένταση κυκλώματος (Isc)	8,59A	9,02A
Ανοχή ισχύος	+/- 5%	+/- 5%
Διαστάσεις (X*Y*Z mm)	534 X 1.000 X 42	1.490 X 1.000 X 42
Βάρος	7kg	17,5kg
Θερμικά χαρακτηριστικά		
Κανονική θερμοκρασία λειτουργίας	47°C	
Συντελεστής θερμοκρασίας Pmax (γ)	-0,43%/K	
Συντελεστής θερμοκρασίας Voc (β)	-0,35%/K	
Συντελεστής θερμοκρασίας Isc (α)	0,05%/K	
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C έως +85°C	

Συγκεκριμένα, επιλέγονται 10 μονοκρυσταλλικά πάνελ, που καλύπτουν συνολικά επιφάνεια περί τα 15 m². Θα τοποθετηθούν σε μία σειρά, σε δύο τμήματα της στέγης με ΝΔ προσανατολισμό και αζιμούθιο

217°. Τα πάνελ θα τοποθετηθούν πάνω στα κεραμίδια της στέγης και θα ακολουθούν την κλίση της στις 30° (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Κάτοψη της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών περσίδων στη στέγη

3.2.2. Μετατροπείς συχνότητας (Inverters)

Σύμφωνα με το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο της Ελλάδος, τα φωτοβολταϊκά θα συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτροδότησης μέσω μετατροπέων συχνότητας (inverters) και θα λειτουργούν υπό καθεστώς συμψηφισμού, σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση αριθμ. ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/ οικ.175067/2017 [12], σε ετήσια βάση. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η «αποθήκευση» ηλεκτρικής ενέργειας και η αδιάλειπτη κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της κατοικίας.

Για τα πάνελ που θα τοποθετηθούν στο σύστημα των κινητών περσίδων επιλέγεται η εγκατάσταση δύο inverters σειράς, καθώς τα πάνελ θα εγκατασταθούν σε δύο όψεις με διαφορετικούς προσανατολισμούς, οι οποίοι είναι περισσότερο ανθεκτικοί σε φαινόμενα ανισοκατανομής που πιθανόν να προκύψουν. Παράλληλα, εξασφαλίζουν μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, καθώς κάθε σειρά φωτοβολταϊκών λειτουργεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες στο μέγιστο σημείο ισχύος της.

Οι inverters, που επιλέγονται για την συγκεκριμένη εγκατάσταση, είναι δύο, από ένας για κάθε όψη. Τα πάνελ της νοτιοδυτικής όψης συνδέονται με inverter χωρητικότητας 2.500W, ενώ αυτά της νοτιοανατολικής όψης με inverter χωρητικότητας 1.100W με απόδοση περίπου 93%. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο inverter της NA σειράς είναι ελαφρώς υπερδιαστασιολογημένος, καθώς η χωρητικότητα της σειράς των πάνελ ανταποκρίνεται στο 74% της χωρητικότητας του inverter. Επιλέγεται, ωστόσο, ο συγκεκριμένος inverter, καθώς είναι ο μικρότερος διαθέσιμος στην αγορά με ικανοποιητική απόδοση και τεχνικά χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Τα πάνελ της στέγης θα συνδεθούν σε inverter χωρητικότητας 2.500W για να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας και να αποφευχθούν φαινόμενα ανισοκατανομής.

3.2.3. Σύστημα κίνησης και παρακολούθησης του ήλιου (Tracking System)

Για την εγκατάσταση στις περιόδους επιλέγεται η τοποθέτηση συστήματος ανίχνευσης της πορείας του ήλιου που ελέγχει τους τοπικούς κινητήρες κάθε ανοίγματος, οι οποίοι ανοίγουν τις περιόδους. Κάθε κινητήρας συνδέεται με καλώδιο τύπου «bus». Σε κάθε άνοιγμα για τη διευκόλυνση της χειροκίνητης λειτουργίας και την ανεξάρτητη κίνηση των περιόδων κάθε ανοίγματος εγκαθίσταται επιπρόσθετα και ένας χειροκίνητος διακόπτης.

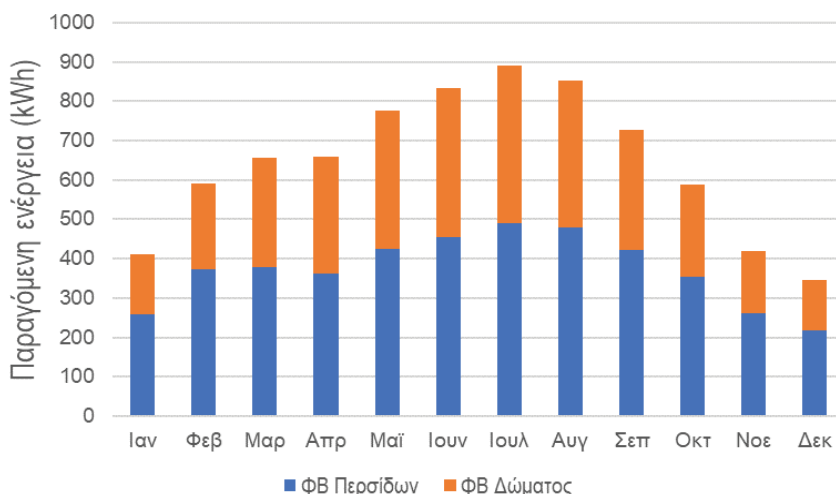
Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα πρότυπα κίνησης του ήλιου και τον προσανατολισμό και τη γεωμετρία κάθε ανοίγματος, η μονάδα ελέγχου δίνει εντολές για την κίνηση των περιόδων. Επιπρόσθετα, υπάρχει και η δυνατότητα να συνδεθεί με τοπικούς αισθητήρες στο κτίριο για να βελτιστοποιείται η ανίχνευση της πορείας του ήλιου και να προκύπτουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα [13]. Τέλος σε περίπτωση ανάγκης οι περιόδους παίρνουν συγκεκριμένες επιθυμητές θέσεις στη διάρκεια της ημέρας, όπως για παράδειγμα να κλείνουν πλήρως κατά τη διάρκεια καθαρισμού ή σε περίπτωση έντονων καιρικών φαινομένων.

3.2.4. Παραγωγή ενέργειας

Για τον υπολογισμό της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται το λογισμικό System Advisor Model (SAM) το οποίο αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. και διατίθεται δωρεάν για να διευκολύνει τον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων για την εγκατάσταση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [14]. Το λογισμικό, που χρησιμοποιείται κατά κόρον από ερευνητές αλλά και επαγγελματίες στους τομείς των ΑΠΕ [15], [16], [17], βασίζεται στην μηχανική δυναμική προσομοίωση του TRNSYS [16].

Τα ωριαία κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των νέων επεμβάσεων προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Energy Plus για τη Θεσσαλονίκη [18] και είναι της μορφής τυπικού μετεωρολογικού έτους (ΤΜΥ). Με την εισαγωγή στο λογισμικό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, στοιχείων προσανατολισμού και απόδοσης και οικονομικών δεδομένων για τα επιλεγμένα πάνελ, υπολογίστηκε η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα, καθώς και οικονομικά στοιχεία, όπως ο χρόνος απόσβεσης.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια η προσομοίωση γίνεται για τον κάθε προσανατολισμό και το κάθε σύστημα χωριστά. Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς, τα πάνελ της ΝΔ όψης είναι ικανά να παράγουν, τουλάχιστον 3.299 kWh ετησίως. Τα αντίστοιχα στη ΝΑ όψη παράγουν ετησίως 1.180 kWh, ενώ αυτά της στέγης 3.271 kWh. Επομένως, η συνολική παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ ανέρχεται σε 7.750 kWh, μέγεθος που καλύπτει το σύνολο των αναγκών του κτιρίου σε ηλεκτρισμό και ψύξη και θα μπορούν να υποβοηθούν και τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης.



Εικόνα 10: Μηνιαία παραγωγή των Φωτοβολταϊκών πάνελ από το SAM

3.2.5. Κόστος Φ/Β συστήματος

Το συνολικό κόστος των συστημάτων για τις δύο όψεις και τη στέγη ανέρχεται σε 11.674€, με τα επιμέρους κόστη να παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 με βάση τις τρέχουσες τιμές της αγοράς.

Πίνακας 3: Κόστος συστήματος με φωτοβολταϊκά πάνελ (στέγη και περισίδες)	
Συστήματα	Μοναδιαίο Κόστος
Φωτοβολταϊκά πάνελ περισίδων	82€
Φωτοβολταϊκά πάνελ στέγης	240€
Inverter (2.500W)	1.500€
Inverter (1.100W)	1.000€
Tracking System	300€
Τέλη σύνδεσης δικτύου	555€
Λοιπά ηλεκτρικά μέρη (καλωδιώσεις, μετρητές, κλπ.)	300€

3.3. Ηλιακό σύστημα παραγωγής ΖΝΧ

Για την κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ προτείνεται η αξιοποίηση του υφιστάμενου συστήματος των επίπεδων συλλεκτών του δώματος. Για την ομαλή λειτουργία του συστήματος προτείνεται η αντικατάσταση της υφιστάμενης δεξαμενής αποθήκευσης με μία νέα, συνολικής χωρητικότητας 600 lt και κόστους 600€.

Οι υφιστάμενοι συλλέκτες είναι επίπεδοι με $FR_{ta}=0,77$ και $FR_{UL}=3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Είναι τοποθετημένοι με κλίση 30 μοιρών και αζιμούθιο ίσο με 180 μοίρες σε τμήμα του δώματος του κτιρίου (Εικόνα 9), με συνολική επιφάνεια των συλλεκτών 9,2 m². Το μπόιλερ έχει συνολική χωρητικότητα 600lt, αναλογία ύψους προς διάμετρο 2,48, ενώ η απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας είναι 0,9 και η θερμοκρασία εξόδου ορίζεται στους 45 °C, σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία του Τ.Ε.Ε. «Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010» [5].

Για τον υπολογισμό του ενεργειακού οφέλους χρησιμοποιείται η μέθοδος των καμπύλων f, τροποποιημένη ώστε να καλύπτει τόσο τις ανάγκες σε ΖΝΧ όσο και για την υποβοήθηση της θέρμανσης [19]. Για την παραγωγή ενέργειας για ΖΝΧ λαμβάνεται υπόψη ως ημερήσια κατανάλωση τα 50 lt/μέρα/άτομο για τους 4 νοίκους. Η ημερήσια απαίτηση σε ΖΝΧ είναι, επομένως, 200 lt.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 3.506 kWh επομένως, η απαίτηση σε ΖΝΧ, η οποία είναι 2.485 kWh καλύπτεται κατά 100% ενώ το ηλιακό μπορεί να προσφέρει και υποβοήθηση στο σύστημα θέρμανσης κατά την χειμερινή περίοδο σε ποσοστό έως και 11%.

3.4. Οικονομική ανάλυση συστημάτων

Το κόστος της αρχικής επένδυσης για την μετατροπή του συστήματος θέρμανσης σε λέβητα φυσικού αερίου ανέρχεται σε 600€. Παράλληλα όμως, τα λειτουργικά έξοδα για τη θέρμανση της κατοικίας περιορίζονται περίπου κατά 65%, καθώς το κόστος λειτουργίας του λέβητα φυσικού αερίου ανέρχεται σε 0,077 €/kWh, ενώ το σχετικό κόστος ενός λέβητα πετρελαίου είναι 0,117 €/kWh [20].

Το συνολικό κόστος της ενσωμάτωσης των ΦΒ στις όψεις και τη στέγη ανέρχεται σε 11.674€, ποσό που αναλογεί σε 1,51 €/Wdc. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος της υποκαθιστούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ, χάρις στον ετήσιο συμψηφισμό, ανέρχεται σε 0,11 €/kWh για συνολική κατανάλωση 6.500 kWh σύμφωνα με την τιμολογιακή πολιτική για το οικογενειακό τιμολόγιο της Δ.Ε.Η. [21].

Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω, καθώς και το κόστος για την αντικατάσταση της δεξαμενής του ΖΝΧ, το συνολικό κόστος των επεμβάσεων ανέρχεται στα 12.874€ με μέσο χρόνο απόσβεσης τα 11 έτη. Η συνολική ενεργειακή απαίτηση που καλύπτεται από τις επεμβάσεις μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι 11.256 kWh. Επομένως, καλύπτεται σχεδόν το 60% της συνολικής ετήσιας απαίτησης των 18.839 kWh (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Ανάλυση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων ανά χρήση από ΑΠΕ

Χρήση	Υφιστάμενη κατανάλωση (kWh)	Παραγωγή από ΑΠΕ (kWh)
Θέρμανση	9.854	2.271 (υποβοήθηση)
Ηλεκτρισμός	6.500	6.500
Ζεστό Νερό Χρήσης	2.485	2.485
Σύνολο	18.839	11.256

Υπάρχει η δυνατότητα και για κάλυψη του συνόλου σχεδόν των ενεργειακών απαιτήσεων της κατοικίας, με αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης με αντίλη θερμότητας, οι απαιτήσεις της οποίας μπορούν να καλυφθούν αβίαστα με ενσωμάτωση επιπλέον ΦΒ πάνελ στη στέγη του κτιρίου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, προτείνονται τρεις βασικές επεμβάσεις για να επιτευχθεί ο στόχος της μετατροπής της τυπικής αυτής κατοικίας σε κτίριο σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης με αισθητική αναβάθμιση του κτιρίου και παράλληλη κάλυψη του συνόλου σχεδόν των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση, ψύξη, ηλεκτρισμό και ΖΝΧ με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτόπου στο κτίριο. Η λογική που ακολουθείται, μετά από μελέτη των κλιματολογικών δεδομένων της περιοχής, αυτοψία και συζητήσεις με τους ενοίκους, είναι η χρήση διαφορετικών συστημάτων ΑΠΕ για κάθε διαφορετική χρήση ενέργειας.

Αρχικά, διερευνάται η ενσωμάτωση ενός σύγχρονου συστήματος φωτοβολταϊκών περισίδων, στις όψεις με νοτιοδυτικό και νοτιοανατολικό προσανατολισμό, που συνδυάζουν σκίαση της κατοικίας, και επομένως την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων, με παράλληλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την πλήρη των αναγκών σε ηλεκτρισμό, πάνελ τοποθετούνται και σε τμήμα της στέγης του κτιρίου. Η επιλογή της ενσωμάτωσης των ΦΒ πάνελ στο σύστημα σκίασης των όψεων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα τόσο για τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου σε θέρμανση και ψύξη, όσο και για την αισθητική και αρχιτεκτονική αναβάθμισή του, σε αντίθεση με μια συμβατική λύση εγκατάστασης των πάνελ απλά στην κεραμοσκεπή. Παρά το αρχικό μεγαλύτερο κόστος, λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος εγκατάστασης των περισίδων η σκίασης και των μεταλλικού φορέα στήριξής τους, που ανέρχεται περίπου σε 4.000€, αλλά και της μικρότερης παραγωγής ενέργειας σε σχέση με ένα πιο τυπικό σύστημα, οι περισίδες θα γίνουν οργανικό κομμάτι των όψεων και όχι απλά ένα επιπρόσθετο στοιχείο στη στέγη.

Παράλληλα, προτείνεται η μετατροπή του υφιστάμενου συστήματος θέρμανσης πετρελαίου σε λέβητα καύσης φυσικού αερίου για την κάλυψη των ετήσιων ενεργειακών αναγκών θέρμανσης, ενώ αξιοποιούνται οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες που υπάρχουν στο δώμα του κτιρίου για την κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ και υποβοήθηση του συστήματος θέρμανσης.

Το συνολικό κόστος των επεμβάσεων ανέρχεται στα 12.874€ με εκτιμώμενο χρόνο απόσβεσης περί τα 11 έτη. Η συνολική ενεργειακή απαίτηση που καλύπτεται από τις επεμβάσεις μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι 11.256 kWh. Επομένως, καλύπτεται σχεδόν το 60% της συνολικής ετήσιας απαίτησης των 18.839 kWh και επιτυγχάνεται ο στόχος της αναβάθμισης της μονοκατοικίας σε μια αρμονικά σχεδιασμένη, σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης κατοικία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. S. Yang, P. a. Heinsohn, and G. F. Bennett, "Sampling and analysis of indoor microorganisms," *J. Hazard. Mater.*, vol. 147, p. 1079, 2007.
- [2] EU, "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)," *Off. J. Eur. Union*, pp. 13–35, 2010.
- [3] Ν. 1577/85, "Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός," *ΦΕΚ 210/Α/18-12-1985*, 1985.
- [4] ΤΕΕ, "Το λογισμικό ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ," 2012. [Online]. Available: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/tee_kenak. [Accessed: 28-Sep-2017].

- [6] Greek Parliament, "Regulation for the Energy Performance of Buildings (K.EN.A.K.)," *Off. Gaz. Hell. Repub.*, pp. 5333–5356, 2010.
- [7] Hellenic Statistical Authority, "A Survey for the energy consumption in households 2011-2012," pp. 2011–2012, 2013.
- [8] G. Martinopoulos, K. T. Papakostas, and A. M. Papadopoulos, "Comparative analysis of various heating systems for residential buildings in Mediterranean climate," *Energy Build.*, vol. 124, pp. 79–87, 2016.
- [9] Colt, "Shadovoltaic photovoltaic solar shading." [Online]. Available: <https://www.coltinfo.co.uk/colt-product-library/solar-shading/shadovoltaic.html>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [10] ES-SO, "Solar and daylight management as an essential concept in the energy performance of buildings," pp. 1–12, 2015.
- [11] PhotonSolar, "POLY CRYSTALLINE PANELS," 2008.
- [12] GreekParliament, "Εγκράτσταση φωτοβολταϊκών σταθμών από αυτοπαραγωγούς με εφαρμογή ενεργειακού συμψηφισμού ή εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού σύμφωνα με το άρθρου 14Α του ν. 3468/2006, όπως ισχύει," *Official Gazette of the Hellenic Republic, B 1547*, 2017.
- [13] Colt, "Soltronic control system for moveable solar shading systems." [Online]. Available: <https://www.coltinfo.co.uk/colt-product-library/control-systems/soltronic.html>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [14] NationalRenewableEnergyLaboratory, "System Advisory Model (SAM)," 2005. [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/>. [Accessed: 05-Sep-2017].
- [15] C. P. Cameron, W. E. Boyson, and D. M. Riley, "Comparison of PV system performance-model predictions with measured PV system performance," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008.
- [16] N. Blair *et al.*, "System advisor model, sam 2014.1. 14: General description," *NREL Rep. No. TP-6A20-61019, Natl. Renew. Energy Lab. Golden, CO*, no. February, p. 13, 2014.
- [17] F. De Andalucia, "System Advisor Model (SAM) Case Study: Gemasolar," *Nrel*, pp. 1–10, 2013.
- [18] EnergyPlus, "Weather Data - Thessaloniki." [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather-search/thessaloniki>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [19] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. 2013.
- [20] K. Papakostas, G. Martinopoulos, and A. Papadopoulos, "A Comparison of Various Heating Systems in Greece Based on Efficiency and Fuel Cost." 17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, At Sokobanja, 2015.
- [21] Δ.Ε.Η., "Δ.Ε.Η. - Οικιακό Τιμολόγιο - Γ1," 2017. [Online]. Available: <https://www.dei.gr>. [Accessed: 10-Sep-2017].

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE (ORC)

***Θεόφιλος Γ. Ευσταθιάδης, Βασίλης Γ. Γκουτζαμάνης, Ανέστης Ι. Κάλφας,**

Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ),
e-mail: theofil@meng.auth.gr, vgkoutzam@meng.auth.gr, akalfas@auth.gr
Τ: (+30)6948060507

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιτακτική ανάγκη περιορισμού της χρήσης των ορυκτών καυσίμων έχει ως φυσικό επακόλουθο την ενίσχυση της χρήσης βιώσιμων πηγών ενέργειας, φιλικότερων προς το περιβάλλον. Έτσι, γίνεται μια στροφή προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προς την κατεύθυνση αυτή διερευνώνται και αναπτύσσονται υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αυξηθεί οι μελέτες για αποδοτικότερα συστήματα Οργανικών Κύκλων Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC) τα οποία, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα, τροφοδοτούμενα από εξωτερική, ανεξάρτητη πηγή ενέργειας.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι ο σχεδιασμός ενός μικροστρόβιλου, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσής του, αλλά και την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής για την εφαρμογή του σε σύστημα οργανικού κλειστού κύκλου Rankine. Για την επίτευξη του στόχου, αρχικά διερευνάται η σύσταση του ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί στον κύκλο και πραγματοποιείται η θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος. Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι σημαντική διότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό της βαθμίδας του στρόβιλου. Ακολουθεί ο διαδιάστατος προκαταρκτικός σχεδιασμός των περυσίων του μικροστρόβιλου με χρήση τριγώνων ταχυτήτων. Τέλος, πραγματοποιείται η στοιχειώδης ανάλυση της τρισδιάστατης γεωμετρίας των περυσίων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και προγραμμάτων ρευστοδυναμικής.

Τελικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης και η συνολικά αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς του συστήματος. Επιπρόσθετα, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα που προσφέρει μια τέτοια τεχνολογία αλλά και οι δυσκολίες που εντοπίζονται σε όλο το σύστημα. Το πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα είναι ότι το ιδανικότερο εργαζόμενο μέσο για τη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος είναι το μείγμα ισοβουτανίου – ισοπεντανίου (15% - 85%), που χαρακτηρίζεται από τον καλύτερο βαθμό απόδοσης και την μεγαλύτερη αποδιδόμενη ισχύ, ενώ παράλληλα το μέγεθός του είναι μειωμένο κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα ρευστά.

Λέξεις Κλειδιά: Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC), σχεδιασμός στρόβιλου, ανάκτηση θερμότητας, υβριδικά συστήματα, υπολογιστική ρευστοδυναμική

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκμετάλλευση θερμικών πηγών χαμηλού ενθαλπικού περιεχομένου, όπως η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας των βιομηχανικών μονάδων, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, εξαιτίας της παγκόσμιας ανησυχίας σχετικά με την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη [1]. Προκειμένου να αποφευχθεί η ενδεχόμενη επιδείνωση αυτών των φαινομένων, έχει προταθεί πληθώρα τεχνικών λύσεων. Από αυτές, η εφαρμογή του κλειστού οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC) έχει αποδειχθεί ως μια από τις επικρατέστερες, ενώ έχει ήδη εφαρμοσθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές [2]. Επιπλέον της ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας, η τροφοδότηση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να προέλθει από εξωτερικές και ανεξάρτητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η γεωθερμία [3], η βιομάζα [4] και η ηλιακή ενέργεια [5].

Ένας κύκλος ORC λειτουργεί παρόμοια με τον απλό κύκλο ατμού Rankine, με τη διαφορά ότι οι τιμές θερμοκρασίας και πίεσης που παρατηρούνται στον ORC είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τον απλό κύκλο [6]. Στους οργανικούς κύκλους Rankine, η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου μπορεί να λάβει τιμές αρκετά χαμηλότερες των 100°C, κάτι που ομολογουμένως αποτελεί μια πολύ χαμηλή τιμή, ειδικά εάν αυτή συγκριθεί με τις αντίστοιχες που παρατηρούνται σε έναν συμβατικό ατμοστρόβιλο. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές πίεσης που παρατηρούνται σε έναν συμβατικό ORC κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 20 και 25 bar, ενώ στον απλό κύκλο Rankine, οι αντίστοιχες τιμές πίεσης που σημειώνονται είναι πολλαπλάσιες αυτών, ακόμη και στην περίπτωση υποκρίσιμων συνθηκών.

Επιπρόσθετα, επειδή τα συστήματα ORC δεν απαιτούν τη χρήση ορυκτών καυσίμων, αποφεύγεται η ανάγκη εγκατάστασης επιπρόσθετων εξαρτημάτων για την προ-επεξεργασία των καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων, που αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό στοιχείο κόστους για τον εκάστοτε σταθμό. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, τα έξοδα εγκατάστασης των σταθμών ORC είναι συνήθως χαμηλότερα από αυτά των συμβατικών ατμοηλεκτρικών εργοστασίων.

Εξαιτίας των χαμηλών τιμών θερμοκρασίας και πίεσης, ο κύκλος ORC απαιτεί τη χρήση ενός εργαζόμενου μέσου, διαφορετικού από το νερό. Η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού είναι μεταξύ άλλων από τους πιο σημαντικούς παράγοντες ολόκληρης της διαδικασίας βελτιστοποίησης ενός συστήματος ORC [7]. Συνεπώς, η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι υψίστης σημασίας. Από σχετικές μελέτες έχει επιβεβαιωθεί ότι το εργαζόμενο ρευστό θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις [8]:

- Υψηλή θερμοχωρητικότητα
- Τιμές κρίσιμης πίεσης ≤ 25 bar καθώς οι μεγαλύτερες τιμές πίεσης απαιτούν ανθεκτικότερα υλικά και αυτό συνεπάγεται την αύξηση του κόστους της εγκατάστασης
- Κρίσιμη θερμοκρασία \geq Θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου για αποφυγή της χημικής αποσύνθεσης του ρευστού
- Χαμηλός λόγος πυκνοτήτων πριν και μετά το στρόβιλο ώστε να χρησιμοποιούνται απλούστεροι και πιο οικονομικοί στρόβιλοι
- Απουσία τοξικότητας, αναφλεξιμότητας και διαβρωτικότητας

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει ότι η επιλογή του ρευστού είναι σημαντική διότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό της βαθμίδας του στροβίλου, ο οποίος με τη σειρά του αποτελεί το πιο σημαντικό και δαπανηρό στοιχείο ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [9].

Σχετικά με τη βιβλιογραφία και τις αντίστοιχες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, οι πρώτες από αυτές βασίζονται σε πειραματικές μελέτες σε εργαστηριακή κλίμακα όπως οι μέθοδοι Monte Carlo και οι θεωρίες διάδοσης σφάλματος. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση στις μέρες μας ονομάζεται «Latin Hypercube» και αποτελεί μια στατιστική μέθοδο παραγωγής ενός ημι-τυχαίου δείγματος παραμετρικών τιμών του επιλεχθέντος ρευστού για μια πολυδιάστατη κατανομή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά για τη διεξαγωγή υπολογιστικών πειραμάτων ή για ενσωμάτωση στη μέθοδο Monte Carlo. Παράλληλα, έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές βελτιστοποίησης για αεροδυναμικά προβλήματα. Ωστόσο, οι περισσότερες των περιπτώσεων περιορίζονται σε απλά προβλήματα όπως μελέτες ροών γύρω από πτέρυγες αλλά και δισδιάστατα περύγια στροβίλων.

Από τις παραπάνω μελέτες, οι περισσότερες παραμένουν κυρίως γενικές ως προς τα αποτελέσματά τους και τον τρόπο προσέγγισης, χωρίς κάποια να έχει αντιμετωπίσει το συγκεκριμένο αντικείμενο σε βάθος γύρω από την αξιόπιστη βελτιστοποίηση των ORC στροβίλων, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στη διερεύνηση των Liu et al. [10], αναλύεται η επίδραση των διαφορετικών εργαζόμενων μέσων στην απόδοση υποκρίσιμων κύκλων ORC. Ορισμένα από τα εργαζόμενα μέσα βρίσκονται σε υγρή φάση (νερό ή αιθανόλη), άλλα σε ξηρή(π.χ. HFE7100, ν-πεντάνιο, ισο-πεντάνιο) και άλλα είναι ισεντροπικά (R11, R123). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας δείχνουν ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτών των κύκλων συσχετίζεται ασθενώς με την κρίσιμη θερμοκρασία. Επίσης, αποδεικνύεται ότι όταν χρησιμοποιείται μια σταθερή πηγή θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις σε σύγκριση με το σχεδιασμό που χρησιμοποιείται για μεταβλητές θερμοκρασίες διακριτών πηγών θερμότητας, όπως η γεωθερμία ή τα απόβλητα βιομηχανικών διαδικασιών.

Οι Saleh et al. [11] πραγματοποίησαν θερμοδυναμική ανάλυση χρησιμοποιώντας 31 εργαζόμενα ρευστά για κύκλους ORC, λειτουργώντας σε θερμοκρασίες εύρους μεταξύ 30°C και 100°C. Από τα σημαντικότερα των συμπερασμάτων αυτής της έρευνας προκύπτει ότι ο υψηλότερος θερμικός βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ξηρών ρευστών σε υποκρίσιμους κύκλους όπου εφαρμόζεται και αναγέννηση.

Οι Lakew και Bolland [12] διερεύνησαν έναν υποκρίσιμο κύκλο Rankine με υπερθέρμανση, λειτουργώντας μεταξύ μιας συνεχούς ροής, μιας πηγής θερμότητας σταθερής θερμοκρασίας (100°C) και μιας ψυχρής πηγής θερμότητας, σταθερής θερμοκρασίας (10°C) για πέντε εργαζόμενα μέσα (R134a, R123, R141b, αμμωνία και νερό). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας αποδεικνύουν την παρουσία δύο βέλτιστων θερμοκρασιών εξάτμισης: i) Η πρώτη ελαχιστοποιεί τη συνολική θερμική αγωγιμότητα των δύο εναλλακτών θερμότητας ενώ η δεύτερη ii) μεγιστοποιεί το καθαρό παραγόμενο έργο. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα αυτά, επιλέγουν το R141b και υπολογίζουν την ελάχιστη θερμική αγωγιμότητα για ένα σύστημα το οποίο παράγει 686 kW ισχύος, καθώς επίσης και την αντίστοιχη θερμική απόδοση (12.6%) αλλά και τις συνολικές απώλειες ενέργειας ως κλάσμα της εξέργειας της πηγής (13.8%). Με παρόμοιο τρόπο, υπολογίζουν την πίεση εξάτμισης ως ανεξάρτητη μεταβλητή και την καθαρή παραγόμενη ισχύ ως συνάρτηση μίας μόνο παραμέτρου. Στη συνέχεια δημιουργούν μια αναλυτική έκφραση για τη βέλτιστη πίεση εξάτμισης η οποία μεγιστοποιεί την καθαρή παραγόμενη ισχύ στην περίπτωση ενός υποκρίσιμου κύκλου με υπερθέρμανση, δείχνοντας ότι τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται για 22 εργαζόμενα μέσα. Επίσης, μέσα από την έρευνά τους επιβεβαιώνουν ότι η καθαρή παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη για εργαζόμενα μέσα των οποίων η κρίσιμη θερμοκρασία είναι κοντά σε αυτήν της πηγής θερμότητας. Για θερμοκρασίες δεξαμενής ίσες με 150°C και 20°C αντίστοιχα, συμπεραίνουν ότι τα ρευστά R114, R245fa, R123, R601a, ν-πεντάνιο, R141b και R113 είναι τα καταλληλότερα εργαζόμενα μέσα.

Σχετικά με τον σχεδιασμό των στροβίλων των συστημάτων ORC, αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί. Οι προσεγγίσεις κάθε μελέτης ποικίλουν, αξιοποιώντας διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, τεχνικές μετρήσεων, γεωμετρικές και λειτουργικές διαφορές, όπως επίσης και ποικίλα ροϊκά πεδία. Οι γεωμετρικές διατάξεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το σκοπό του κάθε ερευνητή. Έτσι, μελετάται η επίδραση των διαφόρων εργαζόμενων μέσων, του τύπου και του μεγέθους του στροβίλου που εφαρμόζεται ώστε τελικά να αναπτυχθούν συγκεκριμένα μοντέλα για την κάθε διάταξη. Παλαιότερες μελέτες βελτιστοποίησης επικεντρώνονται αποκλειστικά στο σχεδιασμό των πτερυγίων [13]. Γενικά, οι μελέτες αυτές εξετάζουν έναν μεγάλο αριθμό σχεδιαστικών παραμέτρων όπως είναι η ελάχιστη μάζα, οι μειωμένες δονήσεις που εφαρμόζονται στον άξονα και η μεγιστοποίηση των παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν την αεροδυναμική απόδοση του ρότορα. Στις μελέτες αυτές, λαμβάνονται υπόψη οι αεροδυναμικοί και οι δυναμικοί κατασκευαστικοί περιορισμοί. Παράλληλα, γίνονται μελέτες ευαισθησίας των σχεδιαστικών παραμέτρων.

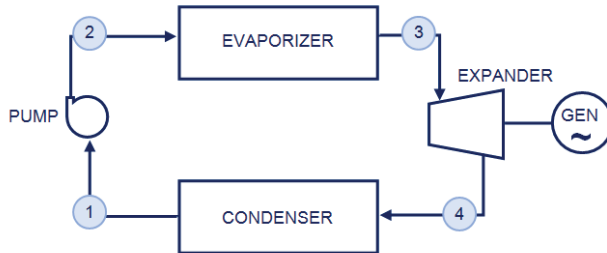
Η καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκεται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού εργαλείου, το οποίο έχει την ικανότητα να καθορίζει το βέλτιστο σχεδιασμό του στροβίλου για κάθε πιθανό εργαζόμενο μέσο σε ένα σύστημα ORC. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται μια πληθώρα ρευστών, σε σχέση με την επίδρασή τους στο φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση της στραγγαλισμένης ροής του μικροστροβίλου, ο ρόλος ενός πυκνού ρευστού σχετίζεται άμεσα με τις σχεδιαστικές επιλογές, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της γεωμετρίας των πτερυγίων. Συνεπώς, το βέλτιστο μείγμα που επιλέγεται επιτρέπει τον σχεδιασμό ενός μικρού και οικονομικού στροβίλου, ακόμα και με τη χρήση πλανητικού κιβωτίου ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, εξετάζεται το βελτιστοποιημένο σύστημα ORC λαμβάνοντας υπόψη τέσσερα διαφορετικά εργαζόμενα ρευστά (R134a, NH₃, ισοπεντάνιο, ισοπεντάνιο) και τα αντίστοιχα μείγματά τους, που αντιπροσωπεύουν τα βέλτιστα μέσα για τέτοιες εφαρμογές, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Τέλος, ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να προσδιορίσει την καταλληλότερη λύση για αύξηση της απόδοσης, λογαριάζοντας ταυτόχρονα και τα χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου, με έμφαση τη μείωση του μεγέθους και του κόστους του μικροστροβίλου. Οι διηχητικές συνθήκες επιτρέπουν την επιθυμητή μείωση του όγκου. Ο

απώτερος σκοπός της μελέτης αυτής είναι η παραμετροποίηση και γενίκευση του σχεδιασμού του στροβίλου, ώστε να ενσωματωθεί σε ένα μεγαλύτερο σχεδιαστικό πλαίσιο κύκλων ORC.

2. Οργανικός Κύκλος Rankine και Οργανικά Ρευστά

2.1. Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλου

Τα βασικά μέρη που συναποτελούν ένα σύστημα ORC απεικονίζονται στην Εικόνα 1 και είναι τα εξής: μία αντλία (pump), ένας εξατμιστής (evaporizer), ένας στρόβιλος (expander) κι ένας συμπυκνωτής (condenser). Η αντλία (διεργασία 1→2) συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο το οποίο στη συνέχεια εισέρχεται στον εξατμιστή. Ο ρόλος του τελευταίου είναι να εξατμίζει το εργαζόμενο ρευστό (διεργασία 2→3) αξιοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα διαφόρων θερμικών πηγών όπως γεωθερμικές και ηλιακές πηγές, θερμικά απόβλητα βιομηχανικών μονάδων (π.χ. από την καύση βιομάζας, από λάδια μηχανών κατεργασίας κ.ά.) και από αστικά απόβλητα. Στη συνέχεια, ο ατμός υψηλής πίεσης εκτονώνεται στο στρόβιλο του συστήματος (διεργασία 3→4), παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια διαμέσου γεννήτριας (GEN) με την οποία είναι συνδεδεμένος. Τέλος, το ρευστό εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση (διεργασία 4→1).



Εικόνα 1: Σχηματική διάταξη κύκλου Rankine

Έχοντας ως σκοπό την εκτίμηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος, οι τιμές που λαμβάνονται υπόψη για συγκεκριμένες θερμοδυναμικές παραμέτρους στηρίζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Οι απώλειες πίεσης στον εξατμιστή θεωρούνται ίσες με 5% [1]. Επιπλέον, δεδομένης της υπόθεσης των χαμηλών θερμοκρασιακών πηγών της συγκεκριμένης μελέτης, η υπερθέρμανση δε λαμβάνεται υπόψη ενώ η ποιότητα του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου ισούται με 1 (ατμός). Επιπλέον, κάποιες επιπρόσθετες υποθέσεις που γίνονται παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 1):

Πίνακας 1: Υποθέσεις μοντέλου.

Απόδοση αντλίας (η_p)	0.7
Απόδοση στροβίλου (η_T)	0.85
Μηχανικός βαθμός απόδοσης (η_m)	0.97
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (η_{el})	0.97

Το ειδικό έργο της αντλίας υπολογίζεται ως εξής:

$$W_p = \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 * \eta_p} \quad (1)$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό στον εξατμιστή είναι:

$$q_{HOT} = h_3 - h_2 \quad (2)$$

Το ειδικό έργο του στροβίλου είναι:

$$w_T = (h_3 - h_{4IS}) * \eta_T \quad (3)$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται στον συμπυκνωτή είναι:

$$q_C = (h_4 - h_1) \quad (4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανικούς και ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης αντίστοιχα, το παραγόμενο έργο είναι:

$$w_{NET} = (w_T - w_P) * \eta_m * \eta_{el} \quad (5)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης τελικά προκύπτει ως εξής:

$$\eta_{Th} = \frac{w_{NET}}{\dot{m} * (h_{in} - h_{out})} \quad (6)$$

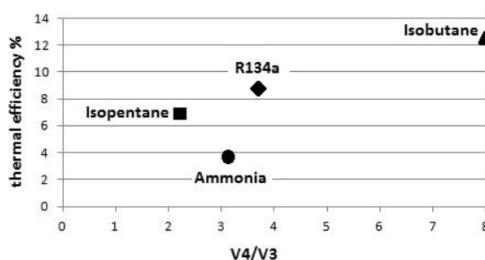
2.2. Ιδιότητες οργανικών ρευστών

Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούνται τέσσερα εργαζόμενα ρευστά. Η επιλογή αυτή γίνεται προκειμένου να υπογραμμιστεί η επίδραση του είδους του κάθε ρευστού στο βαθμό απόδοσης και την καθαρή παραγόμενη ισχύ που αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στη βελτιστοποίηση των κύκλων ORC. Οι ιδιότητες των ρευστών που επιλέγονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά των εργαζόμενων μέσων που χρησιμοποιούνται.

Όνομα- σία	Μορια- κός τύπος	Μορια- κό Βάρος (g/mol)	T _{NBP} (°C)	T _{CRIT} (°C)	P _{CRIT} (Bar)	Τοξι- κότητα	Αναφλεξιμότητα	GWP
Αμμωνία	NH ₃	17.031	-33.3	405.75	113	Υψηλή	Χαμηλή	0
R134a	CH ₂ FCF ₃	102.03	-26.3	374.25	40.6	Χαμηλή	Χαμηλή	1430
Ισο- βουτάνιο	C ₄ H ₁₀	58.12	-11.7	408.05	36.5	Χαμηλή	Υψηλή	~ 3
Ισο- πεντάνιο	C ₅ H ₁₂	72.15	-27.8	460.35	33.8	Χαμηλή	Υψηλή	~ 3

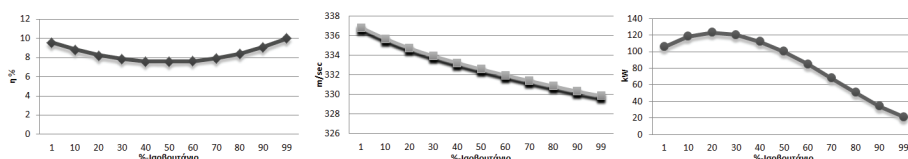
Στη συνέχεια, κρίνεται εύλογο να αναφερθεί και να παρουσιασθεί (Εικόνα 2) ο λόγος των όγκων μετά και πριν την εκτόνωση στο στρόβιλο (V_4/V_3) συναρτήσει της θερμικής απόδοσης του κύκλου. Ο λόγος των όγκων υποδεικνύει το είδος στρόβιλου που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός λόγος εκτόνωσης. Τονίζεται ότι όσο μικρότερος είναι αυτός ο λόγος, τόσο απλούστερος και οικονομικότερος είναι ο στρόβιλος που απαιτείται.



Εικόνα 2: Θερμικός βαθμός απόδοσης ως προς τον λόγο όγκων

Η αμμωνία παρόλο που έχει μηδενικό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP - Global Warming Potential), αποτελεί ένα τοξικό μέσο, το οποίο έχει χαμηλό θερμικό βαθμό απόδοσης για συστήματα χαμηλής ενθαλπίας. Το τετραφθορο-αιθάνιο R134a αποτελεί μια αποδεκτή λύση, καθώς ο βαθμός απόδοσης του είναι ικανοποιητικός, ο λόγος πυκνοτήτων και η θερμοκρασία εξάτμισης είναι χαμηλοί ενώ δεν παρουσιάζει τοξικά χαρακτηριστικά. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του R134a είναι τα σημαντικά

επίπεδα GWP, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή πριν την εφαρμογή του σε ευαίσθητα συστήματα. Στη συνέχεια, το ισοβουτανίο παρουσιάζεται ως το πιο αποδοτικό μέσο από τα τέσσερα που εξετάζονται, αλλά ο λόγος των πυκνοτήτων είναι πολύ υψηλός. Τέλος, το ισοπεντάνιο χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικές τιμές λόγω πυκνοτήτων, ωστόσο, ο βαθμός απόδοσής του είναι χαμηλός. Σε αυτό το σημείο γεννήθηκε η ιδέα δημιουργίας ενός νέου μείγματος με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου ρευστού για το συγκεκριμένο σύστημα. Έτσι, προκειμένου να παραχθεί ένα νέο, υψηλά αποδοτικό εργαζόμενο ρευστό, εξετάζεται ένα μείγμα ισοπεντανίου και ισοβουτανίου. Παρακάτω απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης (Εικόνα 3α), η ταχύτητα του ήχου (Εικόνα 3β) και η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου (Εικόνα 3γ) για διαφορετικές χημικές συνθέσεις του νέου μείγματος.



Εικόνα 3: (α) Θερμικός βαθμός απόδοσης (β) Ταχύτητα ήχου (γ) Ισχύς εξόδου στροβίλου, για διάφορες συνθέσεις του μείγματος

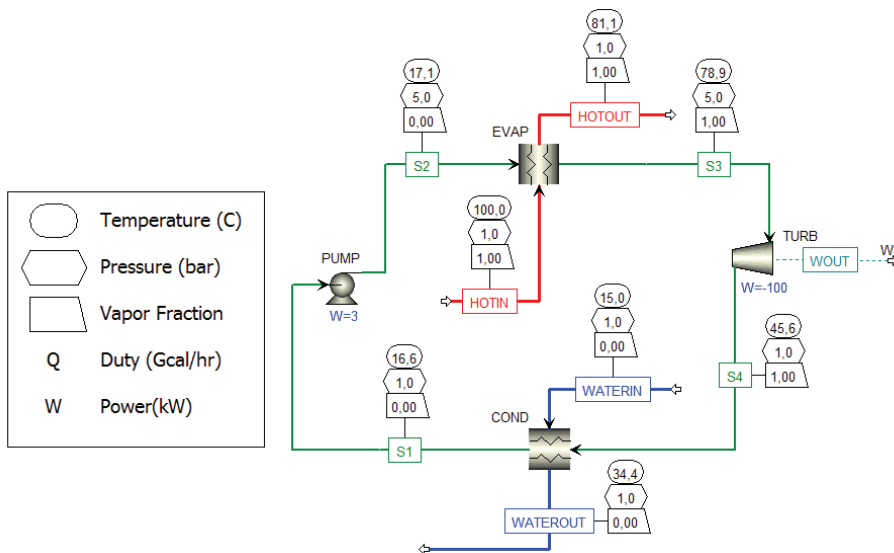
Όπως φαίνεται, ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται για καθαρά μείγματα κι έτσι, οι τιμές του νέου βέλτιστου ρευστού θα κυμαίνονται σε αυτές τις περιοχές. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ιδανικό μείγμα θα έπρεπε να είναι ένα ρευστό του οποίου η σύνθεση να χαρακτηρίζεται από 15% ισοβουτανίο και 85% ισοπεντάνιο, διότι, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με αυξημένη αποδιδόμενη ισχύ για τον στρόβιλο, ενώ η ταχύτητα του ήχου στις συγκεκριμένες συνθήκες, βρίσκεται στις υψηλότερες τιμές.

Για την τελική επιλογή του εργαζόμενου μέσου, λαμβάνονται υπόψη και τα κριτήρια του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3), δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο θερμικό βαθμό απόδοσης:

Πίνακας 3: Κριτήρια επιλογής εργαζόμενων μέσων.

Όνομασία	Θερμ. Βαθμός Απόδοσης (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αμμωνία	6.6	Άμεσα διαθέσιμη, περιβαλλοντικά φιλική,	Επικίνδυνη σε μεγάλες συγκεντρώσεις σε περίπτωση διαρροής
R134a	10.9	Άμεσα διαθέσιμο, καλή απόδοση	Υψηλός δείκτης GWP
Μείγμα Ισοβουτανίο-Ισοπεντάνιο (15-85%)	11%	Άμεσα διαθέσιμο, περιβαλλοντικά φιλικό, καλή απόδοση	Αναφλεξιμότητα

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, γίνεται αντιληπτό ότι το νέο εργαζόμενο ρευστό που δημιουργείται έχει μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης και γι' αυτό το λόγο επιλέγεται ως βέλτιστο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι θερμοδυναμικές μεταβλητές επαληθεύτηκαν και από το λογισμικό προσομοίωσης θερμοδυναμικών διεργασιών (Aspen Plus). Στην εικόνα 4 απεικονίζεται ο υπολογιζόμενος οργανικός κύκλος Rankine, με την επιθυμητή παραγόμενη ισχύ (100 kW_η) και το νέο μείγμα ως εργαζόμενο μέσο.



Εικόνα 4: Αποτελέσματα θερμοδυναμικών μεταβλητών του ORC για μείγμα αποτελούμενο από 15% ισοβουτάνιο – 85% ισοπεντάνιο

3. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να σχεδιαστεί ο στρόβιλος του συστήματος. Η βάση σχεδίασης του μικροστρόβιλου απαρτίζεται από τρεις αδιάστατες παραμέτρους. Η πρώτη, εκφράζει την ικανότητα παραγωγής έργου της βαθμίδας και ονομάζεται «συντελεστής φόρτισης», Ψ . Η δεύτερη ονομάζεται «βαθμός αντίδρασης», R_n , και εκφράζει το λόγο της μεταβολής της στατικής ενθαλπίας, προς τη μεταβολή της ενθαλπίας ανακοπής στον ρότορα. Η τρίτη αδιάστατη παράμετρος ονομάζεται «συντελεστής ροής» Φ και αποτελεί το λόγο ταχυτήτων V_x/U .

Για τον πλήρη σχεδιασμό, απαιτούνται τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ο βαθμός αντίδρασης $R_n = 0\%$
- Η απόλυτη γωνία $\alpha_3 = 0^\circ$
- Η ταχύτητα του ήχου του συγκεκριμένου εργαζόμενου μέσου να είναι ίση με 322.75m/s.

Ο σχεδιασμός περυγίου μηδενικού βαθμού αντίδρασης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μηδενική πτώση πίεσης στο ρότορα
- Μηδενικές διαρροές
- Ελάχιστα αξονικά φορτία
- Ώριμη τεχνολογία σχεδίασης, κάτι που οδηγεί και σε οικονομικότερη κατασκευή του περυγίου.

Στο σημείο αυτό και για χάρη οικονομίας της εργασίας, δε θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη σχεδίαση των περυγίων, καθώς αυτές μπορούν να βρεθούν στη σχετική βιβλιογραφία. Ο σκοπός επίλυσης των εξισώσεων είναι να βρεθούν οι βασικές ροϊκές και γεωμετρικές παράμετροι στην είσοδο του στρόβιλου. Έπειτα, η ταχύτητα επιλέγεται σταθερή για το σημείο όπου ο αριθμός Mach γίνεται ίσος με ένα, κάτι που σημαίνει ότι η ροή είναι στραγγαλισμένη. Η τελική υπόθεση είναι ότι χρησιμοποιείται ένας μονοβάθμιος στρόβιλος. Εφόσον, η καθαρή ισχύς του στρόβιλου είναι ίση με 100kW, η ροή μάζας του εργαζόμενου ρευστού υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{(h_3 - h_4)} \quad (7)$$

Καθώς η πυκνότητα στην έξοδο ρ_4 και η αξονική ταχύτητα είναι γνωστές, η επιφάνεια διατομής του ρότορα μπορεί να υπολογισθεί. Έτσι, μπορούν να υπολογισθούν και οι υπόλοιπες γεωμετρικές παράμετροι (ύψος και μήκος πτερυγίου, διάμετρος άξονα).

$$\dot{m} = \rho * A * V_x \Rightarrow A = \frac{\dot{m}}{\rho * V_x} \quad (8)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα υπολογίζεται ως εξής:

$$U = \frac{V_x}{\phi} \quad (9)$$

Τέλος, επειδή ο υπό μελέτη στρόβιλος θα παράγει ηλεκτρική ισχύ, θα πρέπει να περιστρέφεται με συχνότητα 50Hz, δηλαδή 3.000 σ.α.λ.. Ο περιορισμός αυτός, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι επιθυμούμε να έχουμε στραγγαλισμένη ροή στο στρόβιλο, οδηγούν σε υπερβολικά μεγάλες τιμές παροχής μάζας, οι οποίες είναι αδύνατον να επιτευχθούν. Έτσι, σαν λύση, προτείνεται η μείωση του μεγέθους του στροβίλου και η λειτουργία του σε υψηλότερο αριθμό στροφών με παράλληλη χρήση ενός πλανητικού κιβωτίου ταχυτήτων. Στον Πίνακα 4 στον οποίο παρουσιάζονται και οι λόγοι ταχυτήτων των πλανητικών κιβωτίων για όλες τις περιπτώσεις, παρατηρείται ότι για την περίπτωση όπου το εργαζόμενο μέσο είναι το νέο μείγμα, ο λόγος αυτός είναι ο μικρότερος, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται το μικρότερο και φθηνότερο κιβώτιο ταχυτήτων.

Πίνακας 4 – Αποτελέσματα διάταξης.

Εργαζόμενο μέσο	Αμμωνία	R134a	Μείγμα ισοβουτανίου-ισοπεντανίου
Παραγόμενη ισχύς στροβίλου (kW)	100	100	100
Παροχή μάζας (kg/sec)	1.18	3.7	2
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	12.7 (38.000 σ.α.λ)	14.6 (44.000 σ.α.λ)	6.4 (19.300 σ.α.λ)
Ισχύς αντλίας (kW)	7	14	3
Καθαρή Παραγόμενη ισχύς (kW)	93.4	86	97

Την επιλογή του νέου μείγματος ως εργαζόμενο μέσο για το σύστημά μας, ενισχύουν ακόμα περισσότερο και τα στοιχεία του Πίνακα 4, εξαιτίας της μεγαλύτερης τιμής της παραγόμενης ισχύος και του μικρότερου κιβωτίου ταχυτήτων που απαιτείται.

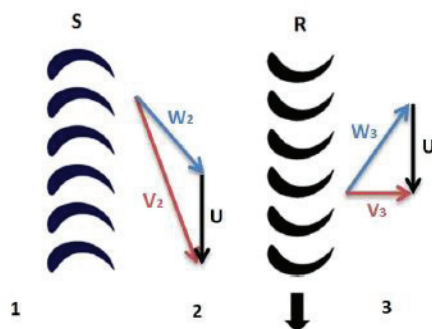
Στη συνέχεια, ένας καλός σχεδιασμός στροβίλου οφείλει να πληροί τα παρακάτω κριτήρια:

1. Η αξονική ταχύτητα θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0.3 Mach για να εξασφαλίζεται η αποφυγή φαινομένων συμπίεσότητας, δηλαδή απωλειών στη ροή.
2. Ο λόγος βάσης-κορυφής θα πρέπει να είναι περίπου ίσος με 0.8 για τον τυπικό σχεδιασμό στροβίλου.
3. Η γωνία διεύρυνσης (flare angle) που απαιτείται για την εξασφάλιση της αρχής διατήρησης της μάζας να είναι τόσο, ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα εμφάνισης ανακυκλοφοριών.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

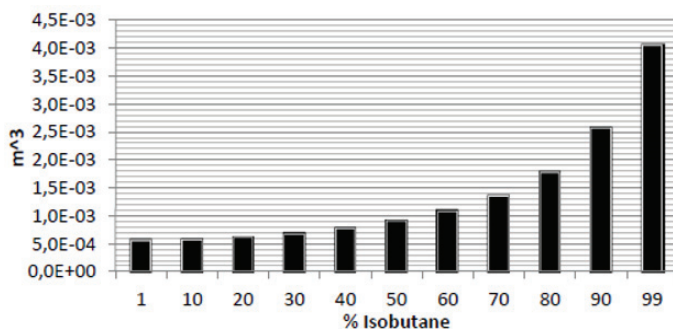
4.1. ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Λαμβάνοντας αρχικά υπόψη όλα τα παραπάνω και με τη βοήθεια των τριγώνων ταχυτήτων παράγεται η δισδιάστατη γεωμετρία των πτερυγίων του ρότορα σύμφωνα με το ρευστό που επιλέγεται (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Μορφολογία πτερυγίου ρότορα στη βάση με εφαρμογή των τριγώνων ταχυτήτων.

Για τον συγκεκριμένο κύκλο ORC, το μείγμα ισοβουτανίου – ισοπεντανίου επιλέγεται ως το βέλτιστο εργαζόμενο ρευστό με βάση τα αποτελέσματα των θερμοδυναμικών κύκλων. Επίσης, διαφορετικές χημικές συστάσεις του μείγματος εξετάζονται, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή λύση, δίνοντας ταυτόχρονα ιδιαίτερη προσοχή στη μείωση του όγκου του στροβίλου. Έτσι, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την απόδοση και την παραγόμενη ισχύ (Εικόνα 3α και Εικόνα 3γ), τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με τη χρήση του μείγματος που δημιουργείται (15% ισοβουτανίου – 85% ισοπεντανίου). Η μείωση του μεγέθους του στροβίλου με το νέο μείγμα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 6). Οι γεωμετρικές τιμές που προκύπτουν από το σχεδιασμό του στροβίλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5:



Εικόνα 6: Μείωση όγκου του στροβίλου για το βέλτιστο ρευστό.

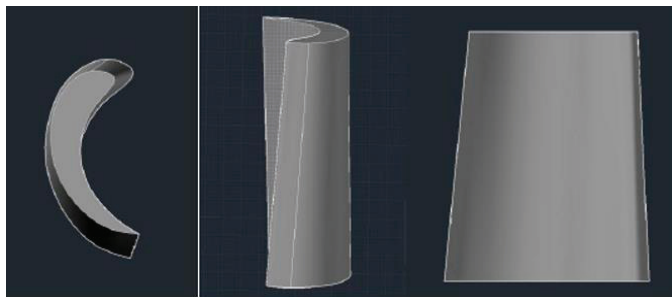
Πίνακας 5. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά στροβίλου.

Ταχύτητα περιστροφής U (m/sec^2)	153.47
Ύψος πτερυγίου (m)	0.0253
Μήκος πτερυγίου (m)	0.0202
Διάμετρος άξονα περιστροφής (m)	0.152
Διατομή επιφάνειας εισόδου (m^2)	0.0116
Διατομή επιφάνειας εξόδου (m^2)	0.0221
Όγκος στροβίλου (m^3)	$5.04 \cdot 10^{-4}$

4.2. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα από τη δισδιάστατη σχεδίαση αλλά και τις τιμές των προηγούμενων πινάκων (Πίνακας 4 & Πίνακας 5), δημιουργείται ένας αλγόριθμος για την τρισδιάστατη σχεδίαση της βαθμίδας του στροβίλου. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του θερμοδυναμικές μεταβλητές όπως ο λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων γ , η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση κ.ά. Στη συνέχεια εισάγονται και οι αρχικές συνθήκες του ρευστού οι οποίες σημειώνονται παραπάνω (θερμοκρασία, πίεση κ.ά.). Στη συνέχεια εισάγονται και οι παράμετροι του στροβίλου όπως ο συνολικός βαθμός απόδοσης, η επιθυμητή ισχύς του στροβίλου από τον σχεδιαστή κ.ά. Τελικά, εξάγονται όλες οι μεταβλητές σχεδίασης του στροβίλου και προκύπτει η τρισδιάστατη (3D) τελική σχεδίαση του περυγίου.

Τα περύγια που σχεδιάζονται φαίνονται στην Εικόνα 7. Ο βαθμός αντίδρασης στη βάση είναι 0% ενώ στην κορυφή αυξάνεται στο 10% για να διατηρηθεί η ακτινική ισορροπία. Κατά τις προσομοιώσεις που εκτελούνται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, λαμβάνονται υπόψη οι ακτινικές μετακινήσεις του ρευστού σύμφωνα με την απλή ακτινική ισορροπία.



Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D) περυγίου στην κορυφή, εμπρόσθια και δεξιά πλευρά.

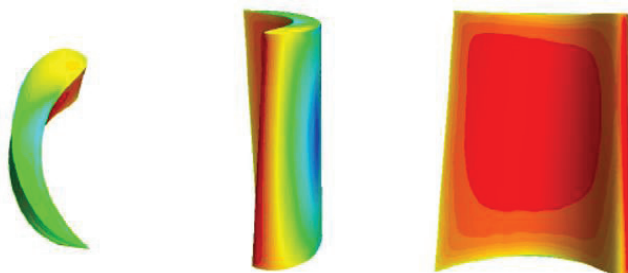
Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται, χρησιμοποιεί κάποιες μεταβλητές εισόδου που σχετίζονται με το ρευστό αλλά και το σχεδιασμό του στροβίλου. Αρχικά δηλώνονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού (λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων γ , πολυτροπικός δείκτης κ , ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση C_p , σταθερά αερίου). Έπειτα, εισάγονται οι αρχικές συνθήκες για το ρευστό (θερμοκρασία, πίεση, πυκνότητα) του εργαζόμενου μέσου πριν την εισαγωγή στο στρόβιλο. Στη συνέχεια, εισάγεται η σχετική ταχύτητα εξόδου του ρευστού για την οποία σχεδιάζονται τα περύγια του ρότορα και τελικά, υπολογίζεται η ενθαλπική διαφορά. Έτσι, υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία εντός του στροβίλου, η μέση ταχύτητα του ήχου και η μεταβολή της πυκνότητας κατά την εκτόνωση αφού μέσα από τη διαδικασία που περιγράφηκε, υπολογίζεται η πυκνότητα στην έξοδο του στροβίλου. Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω, εισάγονται οι παράμετροι του στροβίλου (συνολικός βαθμός απόδοσης, επιθυμητή ισχύς, ταχύτητα περιστροφής των περυγίων του ρότορα για τη μέση γραμμή, λόγος βάσης-κορυφής, στερεότητα περυγίων, λόγος χορδής ως προς το ύψος των περυγίων) και υπολογίζονται οι μεταβλητές σχεδίασης του στροβίλου (μήκος χορδής, κατανομή πάχους αεροτομής). Κλείνοντας, σημειώνεται η προκαταρκτική μελέτη έχει γίνει με βάση ακίνητο περύγιο ρότορα.

4.3. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Στη συνέχεια, ακολουθεί ανάλυση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επίλυση του συστήματος με τη βοήθεια προγράμματος ρευστοδυναμικής. Η εξαγόμενη γεωμετρία εισάγεται σε περιβάλλον εμπορικού λογισμικού όπου και δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα κι έπειτα, επιλύονται τα αντίστοιχα ρευστοδυναμικά μοντέλα.

Με την εισαγωγή της γεωμετρίας και τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος απομένει η ρύθμιση των παραμέτρων ροής και του τρόπου επίλυσης. Για παράδειγμα, επιλέγεται ότι η ροή είναι μόνιμη αλλά και ότι δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Το μοντέλο τύρβης που επιλέγεται για τη συγκεκριμένη επίλυση είναι το $k-\omega$ SST το οποίο ενδείκνυται για μοντελοποίηση της τύρβης στις στροβιλομηχανές. Επίσης, στο στάδιο αυτό επιλέγονται και ρυθμίζονται οι ιδιότητες του ρευστού μέσα από μια λίστα που υπάρχει διαθέσιμη στο συγκεκριμένο λογισμικό. Τέλος, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες προκειμένου τελικά να εφαρμοστεί η μέθοδος επίλυσης.

Τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι η πίεση πάνω στην επιφάνεια των περυγίων. Οι σχετικές κατανομές πίεσης φαίνονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Κατανομή ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πτερυγίου από την επίλυση του ρευστοδυναμικού μοντέλου.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι για τη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται ο σχεδιασμός μόνο του στροβίλου του υβριδικού συστήματος ως προς τα διαφορετικά εργαζόμενα μέσα που επιλέγονται, καθώς αντιπροσωπεύει ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του συστήματος τόσο ως προς τη συνολική απόδοση όσο και ως προς το συνολικό κόστος. Ως μελλοντική εργασία, θα ήταν ενδιαφέρουσα η μελέτη της επίδρασης του εργαζόμενου ρευστού στα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος με μεγαλύτερη έμφαση στον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη μελέτη αυτή, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός στροβίλου που χρησιμοποιείται σε υβριδικό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην τάξη των 100 kW_e. Χρησιμοποιούνται τέσσερα διαφορετικά ρευστά: Αμμωνία, τετραφθοροαιθάνιο (R134a), ισοβουτάνιο και ισοπεντάνιο καθώς και τα μείγματά τους. Τα παρακάτω είναι τα πιο σημαντικά αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν:

- Δημιουργείται ένα υπολογιστικό εργαλείο το οποίο έχει την ικανότητα διαμέσου αλγορίθμου να υπολογίζει τη γεωμετρία του στροβίλου αλλά και τη μορφολογία των πτερυγίων διαμέσου των τριγώνων ταχυτήτων των τους.
- Το ιδανικό εργαζόμενο μέσο που επιλέγεται από τα τέσσερα που εξετάζονται είναι ένα μείγμα (15%) ισοβουτανίου – (85%) ισοπεντανίου. Το μείγμα χαρακτηρίζεται από τον μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης, τη μεγαλύτερη αποδιδόμενη ισχύ, τον μικρότερο λόγο ταχυτήτων στο κιβώτιο ταχυτήτων και το μικρότερο μέγεθος στροβίλου (εδώ πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι χρήση μικρότερων και απλούστερων πτερυγίων προτιμάται καθώς με αυτόν τον τρόπο, περιορίζονται τα επιπλέον κόστη κατασκευής). Με τη χρήση του παραπάνω μείγματος, το μέγεθος του στροβίλου μπορεί να μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους σε σύγκριση με τους στροβίλους που προκύπτουν από τα υπόλοιπα ρευστά.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα μείωσης του μεγέθους του στροβίλου έχει θετικές συνέπειες στο κόστος κατασκευής και συνεπώς, στα έξοδα εγκατάστασης του στροβίλου. Έτσι, αναμένεται ότι το μειωμένο κόστος ενός συστήματος ORC μπορεί να ενισχύσει την ελκυστικότητα του προϊόντος όταν παρουσιασθεί στην αγορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Branchini L., De Pascale A., 2011, “Bottoming cycles for electric energy generation: parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources”, Applied Energy, Vol. 88, pp. 1500-1509.
- [2] Zhao P., Wang J., Gao L., Dai Y., 2012, “Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell”, International Journal of Hydrogen, 37, pp. 3382-3391.
- [3] Drescher U., Brüggemann D., 2007, “Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants”, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, 1, pp. 223-228.

- [4] Efstathiadis T., Rivarolo M., Kalfas A., Traverso A., Seferlis P., 2013, "A Preliminary Turbine Design For an Organic Rankine Cycle", GT2013-94481, ASME Turbo Expo, June 3-7, San Antonio, Texas, USA.
- [5] Iaria D., Khader M., Alzaili J., Sayma A., "Multi-objective Optimisation of a Centrifugal Compressor for a Micro-Gas Turbine Operated by Concentrated Solar Power.", Proceedings of the 1st Global Power and Propulsion Forum, Jan 16-18, Zurich, 2014, GPPF-2017-33.
- [6] Wang J.L., Zhao L., Wang X.D., 2012, "An experimental study on the recuperative low temperature solar Rankine cycle using R245fa", Applied Energy, vol.94, p.34-40.
- [7] Uusitalo A., Tururen-Saaresti T., Guardone A., Gronman A., 2014, "Design and flow analysis of a supersonic small-scale ORC turbine stator with high molecular complexity working fluid", Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26204.
- [8] Kuo C.R., Hsu S.W., Chang K.H., Wang C.C., 2011, "Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system", Energy, 36, pp. 5877-5885.
- [9] Spelling J., Aichmayer L., Laumert B., 2015, "Thermoeconomic evaluation of a novel utility-scale hybrid solar dish micro gas-turbine power plant", Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, GT2015-42368.
- [10] Liu, B. T., Chien, K. H., & Wang, C. C. (2004). Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy*, 29(8), 1207-1217.
- [11] Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J., 2007, "Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles", *Energy*, 32, pp. 1210-1221.
- [12] Ystad, P. M., Lakew, A. A., & Bolland, O. (2013). Integration of low-temperature transcritical CO₂ Rankine cycle in natural gas-fired combined cycle (NGCC) with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 213-219.
- [13] K.Chandrasekhar, M.A. Rao and B.S.P. Kumar, "Optimization Of Gas Turbine Blades," *Indian Streams Research Journal* Volume 2, Issue. 7, Aug 2012.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΤΕΓΗ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΕΙΟΥ

Α.Α. Μπαξεβάνου^{1*}, Δ.Κ. Φείδαρος², Θ. Μπαρτζάνας², Ν. Κατσούλας¹

^{1*} Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, ΠΘ, 38221, Βόλος

² Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας ΙΕΤΕΘ, ΕΚΕΤΑ, 38333, Βόλος
e-mail: cbaxev@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών(ΦΒ) στοιχείων για παραγωγή ενέργειας στη στέγη κτηνοτροφικών κτηρίων αναμένεται να επεκταθεί λόγω της αναμενόμενης αύξησης της τιμής του παρεχόμενου από το δίκτυο ρεύματος και των ευνοϊκών όρων που προβλέπει η νομοθεσία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστήματος συμψηφισμού (netmetering) για τους αγρότες. Ένα θέμα που απασχολεί πάντα τους πιθανούς χρήστες είναι αν η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών είναι πιθανό να επιβαρύνει το εσωτερικό μικροκλίμα του κτηρίου στο οποίο τοποθετείται, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι πλήρως ελεγχόμενο και η ακρίβεια στη ρύθμισή του είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του, κάτι που συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας. Μια τέτοια περίπτωση είναι τα πτηνοτροφεία, τα οποία είναι κλειστά κτηνοτροφικά κτήρια, στα οποία το εσωτερικό μικροκλίμα ρυθμίζεται πλήρως σε τιμές που μεταβάλλονται κάθε μέρα της διατροφής και ως εκ τούτου είναι σημαντικοί καταναλωτές ενέργειας.

Ως περίπτωση εφαρμογής εξετάστηκε πτηνοτροφικός state-of-the-art θάλαμος εγκατεστημένος στη Δυτική Ελλάδα, του οποίου το ένα τμήμα της οροφής είναι καλυμμένο με φωτοβολταϊκά στοιχεία και στον οποίο για το διάστημα της θερινής λειτουργίας του μετρήθηκε η ροή θερμότητας από τη στέγη (στο καλυμμένο και το ακάλυπτο τμήμα), το εσωτερικό μικροκλίμα καθώς και οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Αρχικά αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο energy balance για την μελέτη των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση της καλυμμένης με ΦΒ βιομηχανικής στέγης. Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της κάλυψης της στέγης με φωτοβολταϊκά με βάση μετρήσεις της ροής θερμότητας από το τμήμα της καλυμμένης και το τμήμα της γυμνής στέγης και εντοπίστηκε η εξάρτηση της συμπεριφοράς κάθε τμήματος από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Τέλος εξετάστηκε το μικροκλίμα σε όλο το θάλαμο και κοντά στην οροφή με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Για το χρονικό διάστημα της εκτροφής καλοκαιριού που εξετάστηκε προέκυψε ότι η τοποθέτηση ΦΒ στοιχείων στην οροφή οδηγεί σε υπερθέρμανση του θαλάμου κυρίως διότι εμποδίζεται η ψύξη του κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ωστόσο η υπερθέρμανση αυτή κρίνεται μικρή σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Λέξεις Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά στέγης, κτηνοτροφικό κτήριο, εσωτερικό μικροκλίμα, μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου, CFD

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών (ΦΒ) στοιχείων για παραγωγή ενέργειας στη στέγη κτηνοτροφικών κτηρίων αναμένεται να επεκταθεί λόγω, της αναμενόμενης αύξησης της τιμής του παρεχόμενου από το δίκτυο ρεύματος και των ευνοϊκών όρων που προβλέπει η νομοθεσία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστήματος συμψηφισμού (netmetering) για τους αγρότες. Ένα θέμα που απασχολεί πάντα τους πιθανούς χρήστες είναι αν η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών είναι πιθανό να επιβαρύνει το εσωτερικό μικροκλίμα του κτηρίου στο οποίο τοποθετείται, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι πλήρως ελεγχόμενο και η ακρίβεια στη ρύθμισή του είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του κάπι που συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας. Μια τέτοια περίπτωση είναι τα πτηνοτροφεία τα οποία είναι κλειστά κτηνοτροφικά κτήρια, στα οποία το εσωτερικό μικροκλίμα ρυθμίζεται πλήρως σε τιμές που μεταβάλλονται κάθε μέρα της διατροφής και ως εκ τούτου είναι σημαντικοί καταναλωτές ενέργειας.

Αν και υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία σχετικά με την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κτίρια, αυτή συνήθως περιορίζεται είτε στο κομμάτι της αρχιτεκτονικής, αντικατάσταση δομικών στοιχείων [1, 2], είτε στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας [3], είτε σε ζητήματα που άπτονται της συνολικής περιβαλλοντικής επίδρασης της ενσωμάτωσης ΦΒ σε κτίρια [4, 5]. Λίγες εργασίες αναφέρονται στην επίδραση των φωτοβολταϊκών στο μικροκλίμα του κτηρίου, ενώ υπάρχει σχετική έρευνα στην αξιοποίηση της θερμότητας που περισσεύει από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα (PVT) [6, 7]. Στην περίπτωση αυτή μεγάλη σημασία έχει δοθεί στην ανάγκη ψύξης των ΦΒ μέσω αερισμού για τη βελτίωση της απόδοσής τους [3].

Θεωρείται ότι η τοποθέτηση ΦΒ στοιχείων υπό κλίση σε δώμα έχει ευνοϊκή επίδραση στο μικροκλίμα του κτηρίου εφόσον, αφενός μεν προσφέρουν σκίαση, αφετέρου δε το θερμικό πεδίο που αναπτύσσεται κοντά στα ΦΒ στοιχεία εξαντλείται σε απόσταση μερικών εκατοστών από την επιφάνεια των ΦΒ και έτσι η θερμότητα απάγεται από τον εξωτερικό αέρα χωρίς να εισβάλει μέσα στο κτίριο. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο όταν τα ΦΒ τοποθετούνται σε στέγη και κυρίως σε βιομηχανική στέγη η οποία καλύπτει άμεσα τον εσωτερικό χώρο του κτηρίου και δεν παρεμβάλλεται μια οπλισμένη πλάκα σκυροδέματος. Στην περίπτωση της βιομηχανικής στέγης τα ΦΒ θεωρούνται ενσωματωμένα στο κτίριο και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες για το σχεδιασμό τους, δεδομένου ότι επηρεάζουν το μικροκλίμα του κτηρίου [8]. Στο [9] εξετάστηκε μέσω μετρήσεων η επίδραση ενσωματωμένων ΦΒ είτε στην οροφή, είτε στην πρόσοψη σε πολυώροφο κτίριο σε τροπικό κλίμα και προέκυψε και στις δύο περιπτώσεις μια μέση αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 4 °C. Με μετρήσεις επίσης εξετάστηκε και η απόδοση ΦΒ ενσωματωμένων σε οροφή στο [10].

Συνήθη υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός ΦΒ συστήματος μπορούν να είναι απλοί πηγαίοι κώδικες σε Matlab[11], πιο προχωρημένα συστήματα μοντελοποιημένα στο λογισμικό TRNSYS, καθώς και τα λογισμικά ESPr[12] και EnergyPlus, ενώ μια άλλη επίσης δημοφιλής προσέγγιση είναι οι μετρήσεις πεδίου [3]. Σε αυτό το πλαίσιο στην εργασία [13] γίνεται μια εσωτερική θερμοκρασία διατηρείται στους 24 °C, ενώ όλες οι περιπτώσεις χρήσης ΦΒ μειώνουν τα θερμικά κέρδη του κτηρίου με τη λύση PV/C να έχει την καλύτερη απόδοση. Τέλος έχει χρησιμοποιηθεί και CFD για την προσομοίωση της ροής και της μετάδοσης θερμότητας στο διάκενο ανάμεσα στα ΦΒ και στο κτίριο [14, 15].

Στην εργασία [12] εξετάστηκε με προσομοίωση με το λογισμικό ESPr η περίπτωση ενός κτηρίου ξενοδοχείου σε υπο-τροπικό κλίμα στο οποίο ένας δυτικός τοίχος καλύπτεται με ΦΒ. Εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το διάκενο αέρα ανάμεσα στο ΦΒ και στον τοίχο είναι ανοιχτό προς όλες τις πλευρές έτσι ώστε ο αέρας να μπορεί να κυκλοφορεί λόγω θερμικής άνωσης και να ψύχει την πίσω μεριά των στοιχείων (PV/C) αλλά και λόγω του ανέμου, στη δεύτερη περίπτωση (PV/T) το διάκενο μπορεί να επικονιώνησει με τον εξωτερικό αέρα μόνο μέσω του άνω και του κάτω τμήματος λειτουργώντας σαν ηλιακή καμινάδα και στην τρίτη περίπτωση τα ΦΒ τοποθετούνται και ενσωματώνονται απευθείας πάνω στον τοίχο (BiPV). Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις εξετάστηκε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τα θερμικά κέρδη του κτηρίου, τα οποία συγκρίθηκαν με την περίπτωση του γυμνού τοίχου. Προέκυψε ότι δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην απόδοση του ΦΒ δεδομένου ότι η εσωτερική θερμοκρασία διατηρείται στους 24 °C, ενώ όλες οι περιπτώσεις χρήσης ΦΒ μειώνουν τα θερμικά κέρδη του κτηρίου με τη λύση PV/C να έχει την καλύτερη απόδοση. Τέλος έχει χρησιμοποιηθεί και CFD για την προσομοίωση της ροής και της μετάδοσης θερμότητας στο διάκενο ανάμεσα στα ΦΒ και στο κτίριο [14, 15].

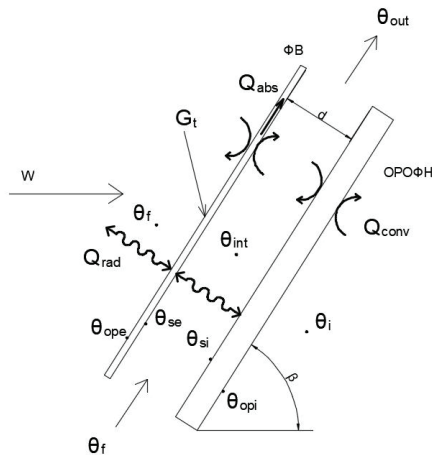
Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ένας πτηνοτροφικός state-of-the-art θάλαμος εγκατεστημένος στη Δυτική Ελλάδα του οποίου το ένα τμήμα της οροφής είναι καλυμμένο με φωτοβολταϊκά στοιχεία και στον οποίο για το διάστημα της θερινής λειτουργίας του μετρήθηκε η ροή θερμότητας από τη στέγη (στο καλυμμένο και το ακάλυπτο τμήμα), το εσωτερικό μικροκλίμα καθώς και οι εξωτερικές κλιματικές

συνθήκες. Αρχικά αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο energy balance για την μελέτη των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση της καλυμμένης με ΦΒ βιομηχανικής στέγης. Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της κάλυψης της στέγης με φωτοβολταϊκά με βάση μετρήσεις της ροής θερμότητας από το τμήμα της καλυμμένης και το τμήμα της γυμνής στέγης και εντοπίστηκε η εξάρτηση της συμπεριφοράς κάθε τμήματος από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Τέλος εξετάστηκε το μικροκλίμα σε όλο το θάλαμο και κοντά στην οροφή με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Αναλυτικό μοντέλο

Η βασική γεωμετρία που περιγράφει το πρόβλημα του υπολογισμού της ροής θερμότητας διαμέσου οροφής καλυπτόμενης από ΦΒ δίνεται στην Εικόνα 1. Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή θερμότητας, φ_{si} , προς το εσωτερικό του θαλάμου αναπτύσσεται το εξής αναλυτικό μοντέλο αποτελούμενο από τρεις εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου[8] και βοηθητικές σχέσεις.



Εικόνα 1: Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα σε ΦΒ και στέγη

Το ισοζύγιο ενέργειας μέσα στο διάκενο αέρα δίνεται από την εξίσωση (1) ακολούθως

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (\theta_{out} - \theta_f) = A \cdot h_{cv1} \cdot (\theta_{se} - \theta_{int}) + A \cdot h_{cv2} \cdot (\theta_{si} - \theta_{int}) \quad (1)$$

Όπου, \dot{m} , η παροχή αέρα στο διάκενο [kg/s], θ_f , η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα [°C], θ_{out} , η θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται ο αέρας από το διάκενο [°C], A , η επιφάνεια του ΦΒ [m²], h_{cv1} , ο συντελεστής συναγωγής με την επιφάνεια του ΦΒ [W/(m²K)], h_{cv2} , ο συντελεστής συναγωγής με την επιφάνεια της οροφής [W/(m²K)], θ_{int} , η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο διάκενο [°C], θ_{se} , η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του ΦΒ [°C] και θ_{si} , η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής [°C].

Το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια του διακένου που είναι σε επαφή με το ΦΒ περιγράφεται από την εξίσωση (2) που ακολουθεί

$$\varphi_{se} = \frac{\theta_{ope} - \theta_{se}}{Re^*} + N_i^* \cdot a_{est} \cdot G_t = \frac{\theta_{se} - \theta_{int}}{R_{cv}} + \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{R_{rd}} \quad (2)$$

Όπου, φ_{se} , η ροή θερμότητας διαμέσου του ΦΒ, θ_{ope} , η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του ΦΒ [°C], Re^* , η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας διαμέσου του ΦΒ [m²K/W], N_i^* , ο συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας [-], a_{est} , ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας του ΦΒ [-], G_t , η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του ΦΒ [W/m²], R_{cv} , η θερμική αντίσταση συναγωγής ανάμεσα στο ΦΒ και το διάκενο αέρα [(m²K)/W] και R_{rd} , η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας ανάμεσα στο ΦΒ και την οροφή [(m²K)/W].

Τέλος το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια του διάκενου που είναι σε επαφή με την οροφή δίνεται από την εξίσωση (3).

$$\varphi_{si} = \frac{\theta_{int} - \theta_{si}}{R_{cv2}} + \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{R_{rd}} = \frac{\theta_{se} - \theta_{opi}}{R_i^*} \quad (3)$$

Όπου, R_{cv2} , η θερμική αντίσταση συναγωγής ανάμεσα στην οροφή και το διάκενο αέρα [(m²K)/W] και R_i^* , η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας διαμέσου της οροφής [(m²K)/W].

Γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του διάκενου αέρα είναι η μέση τιμή ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο. Για τον υπολογισμό της παροχής της μάζας αέρα στο διάκενο χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση [16].

$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{\rho \cdot A_g}{\sqrt{1+A_r}} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot L \cdot (\theta_{int} - \theta_i)}{\theta_i}} \quad (4)$$

Όπου, C_d , ο συντελεστής παροχής [-], ρ , η πυκνότητα του αέρα [kg/m³], A_g , το εμβαδό επιφάνειας διάκενου κάθετου στη ροή [m²], A_r , το κλάσμα εμβαδού εισόδου/εξόδου στο διάκενο ($=1$) [-], g , η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s²], L , το ύψος του διάκενου [m] και θ_i , η θερμοκρασία μέσα στον πτηνοτροφικό θάλαμο [°C].

Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ διάκενου και οροφής, h_{cv2} , υπολογίζεται με βάση τον τους αριθμούς Nu και Ra σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο [13], με χαρακτηριστικό μήκος του διάκενου, d , και για κλίση οροφής, β , ενώ για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής μεταξύ διάκενου και ΦΒ, h_{cv1} , υπολογίζεται με αριθμό Nu σύμφωνα με τη σχέση (5) και ο αριθμός Ra για κλίση (90-β) [17].

$$Nu = 0.27 \cdot Ra_L^{1/4} \quad (5)$$

Η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας ανάμεσα στην επιφάνεια του ΦΒ και στην επιφάνεια της οροφής δίνεται από τη σχέση (6) [16].

$$R_{rd} = \frac{\sigma \cdot (T_{se}^2 + T_{si}^2) \cdot (T_{se} + T_{si})}{\frac{1}{\varepsilon_{pv}} + \frac{1}{\varepsilon_F} - 1} \quad (6)$$

Όπου, σ , η σταθερά Stefan-Boltzmann, ε_{pv} , ο συντελεστής εκπομπής του ΦΒ και ε_F , ο συντελεστής εκπομπής της οροφής. Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της οροφής, θ_{opi} , υπολογίζεται από τη σχέση (7)

$$\frac{\theta_{se} - \theta_{opi}}{R_i^*} = \frac{\theta_{opi} - \theta_i}{R_i} \quad (7)$$

Όπου, R_i , ο συντελεστής θερμικής αντίστασης της εσωτερικής επιφάνειας της οροφής με τον αέρα μέσα στο θάλαμο.

Τέλος η θερμοκρασία την εξωτερική επιφάνεια των ΦΒ, θ_{ope} , για τη διάρκεια της ημέρας υπολογίζεται από τη σχέση (8) [18].

$$\theta_{ope} = \theta_f + (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \frac{G_f}{G_{NOCT}} \cdot \left(1 - \frac{n_c}{(\tau\alpha)}\right) \cdot \frac{9.5}{(5.7+3.8 \cdot v)} \quad (8)$$

Όπου, T_{NOCT} , η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του ΦΒ, $T_{a,NOCT}$ ίση με 20 °C, G_{NOCT} ίση με 800 W/m²K, $(\tau\alpha)$, το γινόμενο περατότητας – απορρόφησης του ΦΒ, n_c , ο βαθμός απόδοσης του ΦΒ και v , η ταχύτητα του αέρα στην επιφάνεια του ΦΒ [m/s] η οποία υπολογίζεται από την ταχύτητα του ανέμου w , με τη σχέση

$$v = w \cdot \cos\beta \quad (9)$$

Ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία θ_{ope} δίνεται από τη σχέση (10)

$$(h_{rs} + h_{wind}) \cdot (\theta_f - \theta_{ope}) = \frac{\theta_{ope} - \theta_{se}}{R_e^*} \quad (10)$$

Όπου, ο συντελεστής συναγωγής με την ατμόσφαιρα, h_{wind} , δίνεται από τη σχέση

$$h_{wind} = 2.8 + v \quad (11)$$

Και ο συντελεστής ακτινοβολίας, h_{rs} , δίνεται από τη σχέση (12)

$$h_{rs} = \varepsilon_{pv} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{ope}} - T_{\text{sky}}) \cdot (T_{\text{ope}}^2 + T_{\text{sky}}^2) \cdot \frac{T_{\text{ope}} - T_{\text{sky}}}{T_{\text{ope}} - T_f} \quad (12)$$

Ενώ τέλος, η ισοδύναμη θερμοκρασία του ουρανού δίνεται από τη σχέση (13)

$$T_{\text{sky}} = 0.0552 \cdot T_f^{1.5} \quad (13)$$

2.2. Μετρήσεις

Οι μετρήσεις της ροής θερμότητας από την οροφή προς τον πηνοτροφικό θάλαμο έγιναν με χρήση δύο μετρητών ροής θερμότητας τύπου HFP01 HUKSEFLUX, ακρίβειας 5%, οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί σε δύο σημεία της οροφής, ένα στο τμήμα της οροφής που ήταν καλυμμένο με φωτοβολταϊκά και ένα στο τμήμα της οροφής που ήταν ελεύθερο, σε θέσεις όπου η μετάδοση θερμότητας θα μπορούσε να θεωρηθεί μονοδιάστατη. Οι μετρήσεις καταγράφονταν σε καταγραφέα δεδομένων TRSYS01 ως μέσες τιμές 10λέπτου. Στο ίδιο χρονικό διάστημα γινόταν καταγραφή τόσο της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου, όσο και των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου καταγράφηκε με 18 καταγραφικά τύπου Hobo τοποθετημένα σε όλο το θάλαμο σε δύο επίπεδα, σε ύψος 0.5 και 1.5 μέτρου και οι τιμές τους είναι μέσος όρος 10λέπτου.

Οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, μετρήθηκαν σε μετεωρολογικό σταθμού, και οι τιμές είναι ωριαίες μέσος όρος.

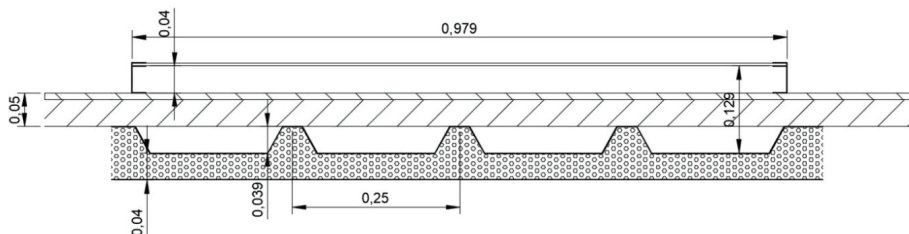
2.3. Προσομοίωση εσωτερικού μικροκλίματος

Το εσωτερικό μικροκλίμα μέσα στο θάλαμο προσομοιώθηκε με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την 23^η μέρα της εκτροφής, για την ώρα 15:30 χρησιμοποιώντας τη ροή θερμότητας στην οροφή και αντίστοιχες θερμοκρασίες μετρημένες στους τοίχους του θαλάμου ως οριακές συνθήκες και τις μετρήσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου για πιστοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου [19].

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

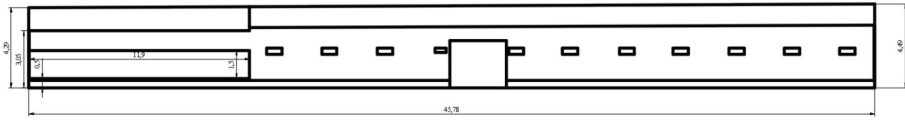
Εξετάστηκε η θερμική συμπεριφορά θαλάμου πηνοτροφείου διαστάσεων 45,78 m x 13,53 m με διριχτή στέγη μέγιστου και ελάχιστου ύψους 4,45 και 3,35m, δυναμικότητας 9180 πτηνών, ο οποίος βρίσκεται στην Άρτα, 39° 06' 51.99" Β – 20° 55' 19.51" Α, σε υψόμετρο 5 m. Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 4 cm (τοιχοί και οροφή), με τιμεντένιο δάπεδο, ενώ περιμετρικά η τοιχοποιία μέχρι το ύψος των 40 cm αποτελείται επίσης από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 15 cm. Η διεύθυνση προσανατολισμού του θαλάμου είναι Βορειοανατολικός - Νοτιοδυτικός (BA-ΝΔ) με το αζιμούθιο της Νοτιοανατολικής πλευράς να είναι 125°. Ο θάλαμος είναι εφοδιασμένος με 5 ανεμιστήρες στο Νοτιοδυτικό τοίχο και με υγρές παρειές μήκους 12 m. Επίσης έχει ανοίγματα αερισμού, τα οποία όμως παραμένανε κλειστά κατά τη διάρκεια της εκτροφής και των μετρήσεων. Η εκτροφή διήρκεσε από τις 24/6/2014 έως τις 4/8/2014, ενώ οι μετρήσεις αφορούν την περίοδο 4/7 έως 4/8. Σε αυτό το χρονικό διάστημα τα πτηνά διένυαν το διάστημα από την 11^η έως τη 42^η ημέρα εκτροφής τους. Η εσωτερική θερμοκρασία ρυθμιζόταν αυτόματα με χρήση συνδυασμού λειτουργίας υγρών παρειών και αξονικών ανεμιστήρων έτσι ώστε να μεταβάλλεται ανάλογα με την ημέρα εκτροφής ως ακολούθως. Έτσι κατά την 11^η ημέρα εκτροφής, η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας ήταν 27°C, και στη συνέχεια μειωνόταν κατά 1°C κάθε τρεις ημέρες μέχρι τη θερμοκρασία των 19 °C.

Το Νοτιοανατολικό μέρος της οροφής, με κλίση 9°, ήταν καλυμμένο με φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία είχαν μέγιστη απόσταση από την οροφή 13 cm όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 2.

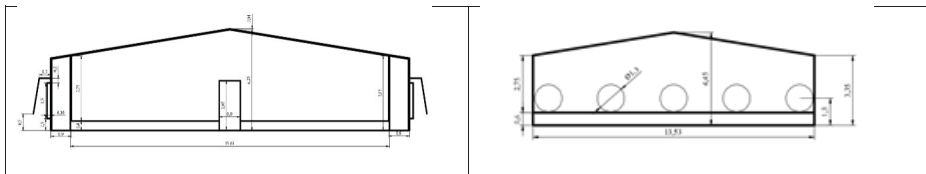


Εικόνα 2: Τομή οροφή καλυμμένης με φωτοβολταϊκό

Στις Εικόνες 3 και 4 δίνεται η πλάγια όψη και οι όψεις του θαλάμου



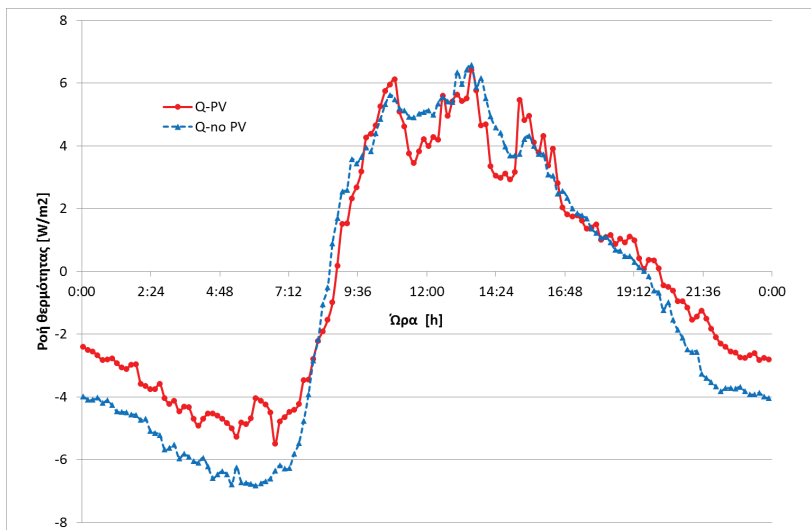
Εικόνα 3: Πλάγια όψη θαλάμου



Εικόνα 4: Όψεις θαλάμου

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

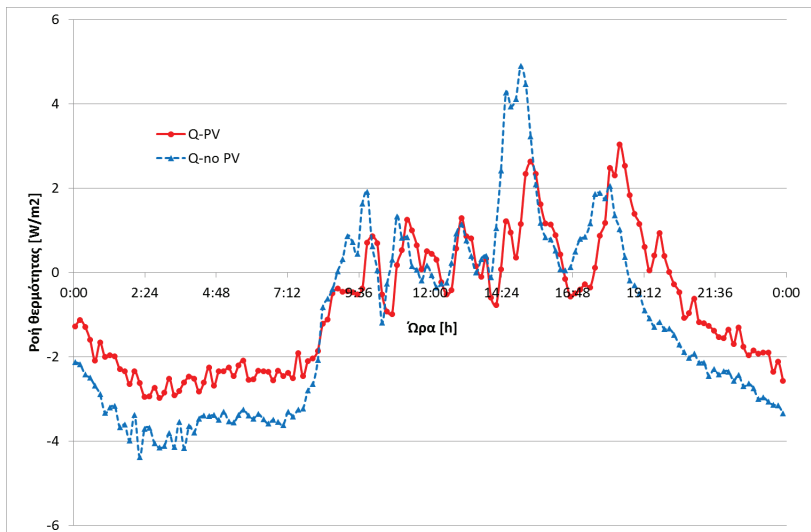
Στην Εικόνα 5 δίνεται η μεταβολή της ροής θερμότητας από το τμήμα της οροφής που είναι καλυμμένο με ΦΒ στοιχεία, καθώς και από το γυμνό τμήμα σε όλη τη διάρκεια της 13^{ης} ημέρας της εκτροφής όταν η θερμοκρασία λειτουργίας ήταν 27 °C. Θετική ροή θερμότητας σημαίνει ότι η θερμότητα εισέρχεται από έξω προς τον θάλαμο ενώ αρνητική ροή θερμότητας όταν εξέρχεται από τον θάλαμο, κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε και ο θάλαμος ψύχεται. Και στις δύο περιπτώσεις η ροή θερμότητας στο τμήμα που καλύπτεται με ΦΒ είναι μικρότερη από ότι στο γυμνό μέρος της οροφής.



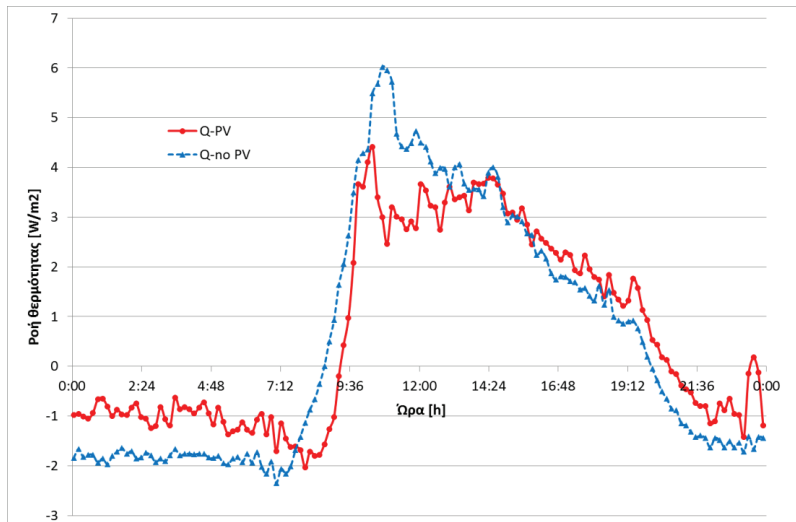
Εικόνα 5: Ροή θερμότητας από την οροφή κατά την 13η ημέρα εκτροφής

Στις Εικόνες 6 και 7 δίνεται η ροή θερμότητας για άλλες δύο μέρες. Στην Εικόνα 6 δίνεται η ροή θερμότητας για την 23^η ημέρα εκτροφής, με θερμοκρασία λειτουργίας 24 °C, για την οποία έχει γίνει και προσομοίωση του εσωτερικού μικροκλίματος με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, ημέρα με

νεφοκάλυψη. Ενώ στην Εικόνα 7 δίνεται η ροή θερμότητας για την τελευταία, 42^η μέρα εκτροφής όταν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 19 °C. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας τόσο αυξάνεται η ροή θερμότητας προς το θάλαμο. Σε όλες τις περιπτώσεις η παρουσία των ΦΒ εμποδίζει τη θερμότητα να εισέλθει στο χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά κατά τη διάρκεια της νύχτας εμποδίζει το θάλαμο να ψυχθεί.



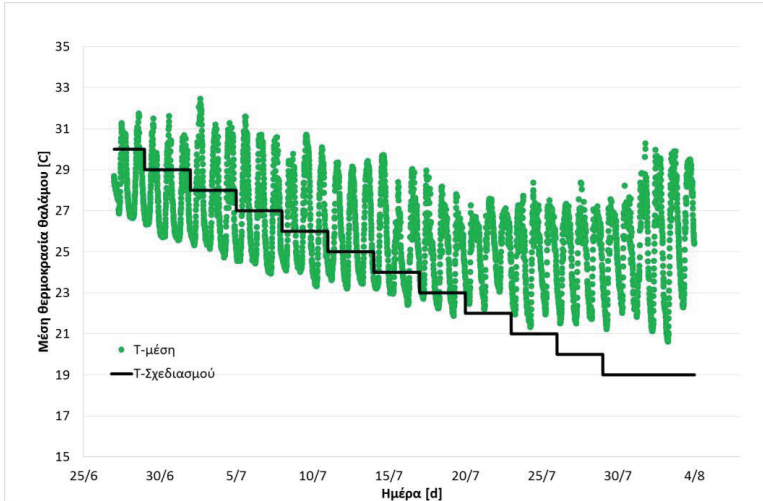
Εικόνα 6: Ροή θερμότητας από την οροφή κατά την 23η ημέρα εκτροφής



Εικόνα 7: Ροή θερμότητας από την οροφή κατά την 42η ημέρα εκτροφής

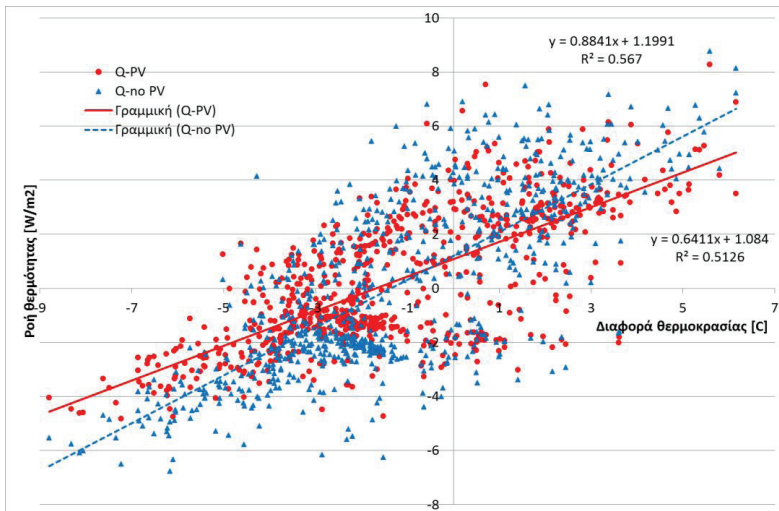
Στην Εικόνα 8 δίνεται η μέση θερμοκρασία στο θάλαμο κατά τη διάρκεια όλης της εκτροφής όπως αυτή μετρήθηκε από τα 18 Hobos. Στο ίδιο γράφημα παριστάνεται και η θερμοκρασία σχεδιασμού. Είναι φανερό ότι κατά τις τελευταίες ημέρες της εκτροφής, οπότε και η θερμότητα που εκλύεται από τα

πτηνά είναι σημαντική, δεν είναι δυνατή η διατήρηση της θερμοκρασίας σε τόσο χαμηλά επίπεδα, ούτε κατά τη διάρκεια της νύχτας.



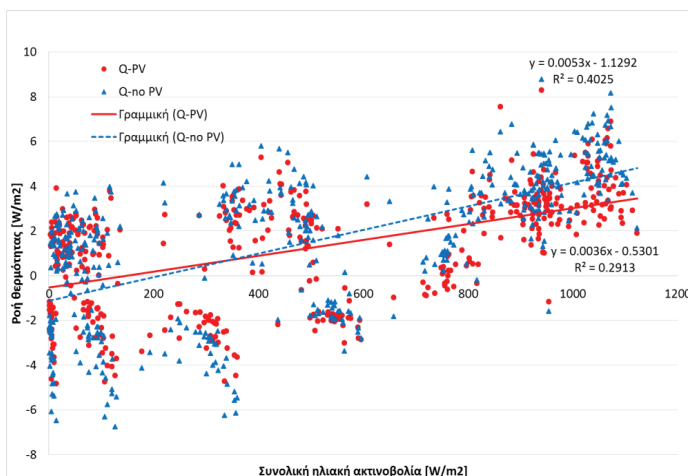
Εικόνα 8: Μέση εσωτερική θερμοκρασία στον πτηνοτροφικό θάλαμο

Η ροή θερμότητας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θάλαμο και το εξωτερικό περιβάλλον καθώς και από την ακτινοβολία. Στην Εικόνα 9 δίνεται η μεταβολή της ροής θερμότητας για τα δύο τμήματα της οροφής συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας της εξωτερικής από την εσωτερική θερμοκρασία. Στο ίδιο γράφημα δίνονται και οι γραμμικές γραμμές τάσεις για κάθε περίπτωση καθώς και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε αυτές. Η θερμότητα αρχίζει να ρέει από έξω προς τα μέσα όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι περίπου $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ από διαφορά θερμοκρασίας -1 και μετά η ροή θερμότητας διαμέσου της γυμνής στέγης είναι πιο σημαντική από αυτή της καλυμμένης με ΦΒ στέγης. Η καλυμμένη με ΦΒ στέγη φαίνεται να έχει ένα συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας της τάξης του 0.64 ενώ η γυμνή στέγη της τάξης του 0.884 . Σε αυτούς τους συνολικούς συντελεστές θερμοπερατότητας περιλαμβάνεται η μετάδοση θερμότητας με όλους τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στο αναλυτικό μοντέλο.



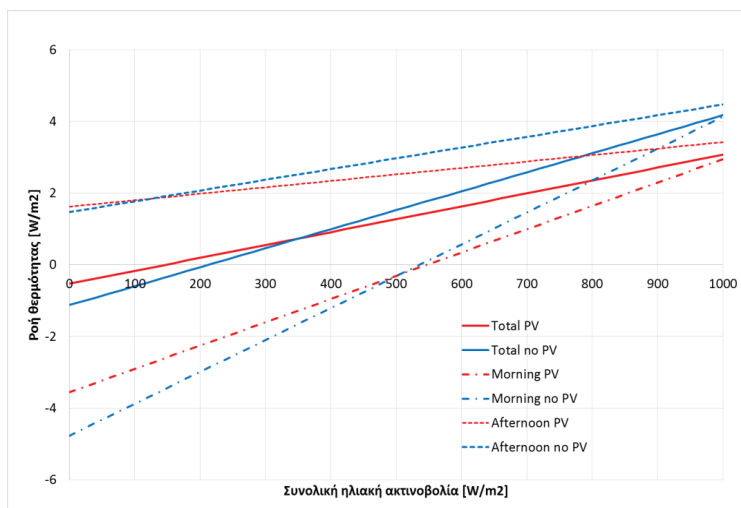
Εικόνα 9: Ροή θερμότητας συναρτήσει διαφοράς θερμοκρασίας

Στην Εικόνα 10 εξετάζεται η εξάρτηση της ροής θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία. Παρά το γεγονός ότι η γυμνή στέγη έχει Βορειοδυτικό προσανατολισμό η κλίση της είναι τόσο μικρή ώστε αυτό να μην επιδρά σημαντικά στην τελικά διαθέσιμη ακτινοβολία.



Εικόνα 10: Ροή θερμότητας συναρτήσει ηλιακής ακτινοβολίας

Η ροή θερμότητας φαίνεται να γίνεται ισχυρότερη για τη γυμνή στέγη από ηλιακή ακτινοβολία μεγαλύτερη από 300 W/m^2 και μετά. Ωστόσο φαίνεται να υπάρχει σημαντική διασπορά γύρω από τις γραμμές τάσεις με συγκεντρώσεις σε ορισμένες περιοχές που υποδεικνύουν, ότι και άλλοι παράγοντες συμμετέχουν στην εξέλιξη του φαινομένου. Ένας από αυτούς είναι η θερμική αδράνεια του κτιρίου που αν και σχετικά μικρή κατά τις πρωινές ώρες δίνει ροή θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου προς τα έξω παρά την ηλιακή ακτινοβολία και την αρνητική διαφορά θερμοκρασίας. Συνεπώς, εξετάστηκε η συμπεριφορά της ροής θερμότητας ξεχωριστά για πρωινές και απογευματινές ώρες και η γραμμική προσέγγιση των αποτελεσμάτων δίνεται για κάθε περίπτωση ξεχωριστά στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Ροή θερμότητας συναρτήσει ηλιακής ακτινοβολίας για πρωινές και απογευματινές ώρες

Πραγματικά, η θερμική αδράνεια του κτιρίου τροποποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά της στέγης συναρτήσει της ακτινοβολίας. Ενώ κατά τη διάρκεια των απογευματινών ωρών η γυμνή στέγη επιτρέπει σχεδόν πάντα την είσοδο περισσότερης θερμότητας στο θάλαμο, κατά τις πρωινές ώρες η ροή θερμότητας παραμένει αρνητική μέχρι η ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει τα 500 W/m^2 οπότε και η επίδραση της ακτινοβολίας επιβάλλει τη φορά τη ροής θερμότητας.

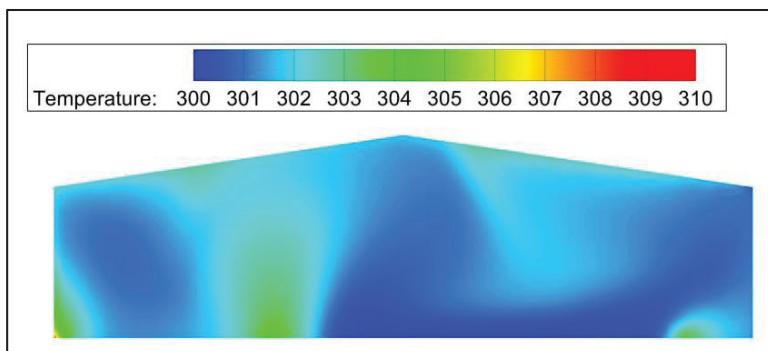
Το ζητούμενο βέβαια είναι να εντοπιστεί η συνολική συμπεριφορά του κάθε τμήματος της στέγης κατά τη διάρκεια όλης της εκτροφής. Έτσι στον Πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης της εισερχόμενης και εξερχόμενης θερμότητας από τα δύο τμήματα της οροφής κατά τη διάρκεια του ενός μήνα των μετρήσεων.

Πίνακας 1: Συνολική ροή θερμότητας

Ροή θερμότητας	Τμήμα Οροφής με ΦΒ	Τμήμα Οροφής χωρίς ΦΒ
Εισερχόμενη θερμότητα [Wh/m^2]	909.22	1094.37
Εξερχόμενη θερμότητα [Wh/m^2]	-713.46	-1054.9
Υπερθέρμανση [Wh/m^2]	195.76	39.47
Συνολική Υπερθέρμανση [kWh]	61.91	12.57

Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι από το τμήμα της οροφής με τα ΦΒ ο θάλαμος επιβαρύνεται περισσότερο με θερμικό φορτίο δεδομένου ότι στην καλοκαιρινή περίοδο κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ήταν πιο δύσκολη η βραδινή ψύξη του θαλάμου. Παρά το γεγονός ότι η υπερθέρμανση που δημιουργείται είναι πενταπλάσια αυτής της γυμνής οροφής, η συνολική υπερθέρμανση για όλο το θάλαμο αντιστοιχεί σε 61.91 kWh στη διάρκεια ενός μήνα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε όλη τη διάρκεια του μήνα καταναλώνεται ενέργεια προκειμένου να διατηρηθεί η θερμοκρασία του θαλάμου στα επιθυμητά επίπεδα προκύπτει ότι η ύπαρξη ΦΒ επιβαρύνει το ψυκτικό φορτίο του θαλάμου κατά 61.91 kWh μηνιαίως. Η ηλεκτρική ενέργεια που θα πρέπει να καταναλωθεί για την κάλυψη αυτού του ψυκτικού φορτίου εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης του συστήματος ψύξης που χρησιμοποιείται. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις 7300 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που αναμένεται να παραχθούν από τα ΦΒ της στέγης κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.

Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, λόγω του μεγάλου μεγέθους του θαλάμου, η επίδραση της λειτουργίας της οροφής περιορίζεται κοντά την οροφή του κτιρίου και κυρίως όταν λειτουργεί ένας μόνο ανεμιστήρας όπως φαίνεται από τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες σε τομή, σε απόσταση 30 m από την είσοδο του θαλάμου, που δίνονται στην Εικόνα 12 και οι οποίες προέκυψαν από προσομοίωση με υπολογιστική ρευστοδυναμική του εσωτερικού μικροκλίματος, για το μεσημέρι της 23^{ης} ημέρας εκτροφής, με λειτουργία μόνο του κεντρικού ανεμιστήρα.



Εικόνα 12: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες στο θάλαμο του πτηνοτροφείου

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τοποθέτηση ΦΒ στοιχείων σε βιομηχανικές στέγες είναι ευρέως διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια. Ενώ στην περίπτωση των ΦΒ σε δώματα το ζήτημα της πιθανής επιβάρυνσης των ψυκτικών φορτίων δεν υφίσταται, στην περίπτωση της βιομηχανικής στέγης ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό είναι πιο περίπλοκος και χρήζει μελέτης.

Στην περίπτωση που εξετάστηκε αποδείχθηκε μέσω μετρήσεων ότι η τοποθέτηση των ΦΒ τελικά οδηγεί σε μικρή υπερθέρμανση στο θάλαμο τον οποίο καλύπτει η στέγη, εφόσον ο μηχανισμός μέσω του οποίου τα ΦΒ εμποδίζουν τη νυχτερινή ψύξη του θαλάμου αποδεικνύεται για το μήνα Ιούλιο πιο σημαντικός από το μηχανισμό που εμποδίζει σημαντικές ποσότητες θερμότητας να εισέλθουν στο θάλαμο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, το ποσό της υπερθέρμανσης είναι αρκετά μικρότερο, από το όφελος που προκύπτει από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Σε κάθε περίπτωση προκύπτει ότι θα πρέπει να γίνεται προσεκτική μελέτη για τον προσδιορισμό του βέλτιστου διακένου μεταξύ ΦΒ και στέγης κάτι που εξαρτάται από τη θέση, τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό της στέγης, αλλά και τη χρήση του θαλάμου σε ετήσια βάση, ενώ θα πρέπει να εξετάζεται παράλληλα και η επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας μέσα στο διάκενο αέρα στην ίδια την απόδοση των ΦΒ στοιχείων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου Green Poultry του προγράμματος ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011, ΕΣΠΑ 2007 - 2013

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sharma, S., 2016, "Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material". *Sol Energ. Mat Sol C.* 149, pp. 29-39.
- [2] Kyllili, A., and Fokaides, A.P., 2014, "Investigation of building integrated photovoltaics potential in achieving the zero energy building target", *Indoor and Built Environment*, 23(1), pp. 92-106.
- [3] Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A.C., del Caño, T., Rico, E., Lechón, J.L., Andrade, L., Mendes, A., BaverAtli, Y.B., 2017, "A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, pp. 833-858.
- [4] Lamnatou, Chr., 2015, "Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications", *Energy Buildings*, 107, pp. 366-375.
- [5] Armstrong, S., and Hurley, W.G., 2010, "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions", *Applied Thermal Engineering*, 30 pp. 1488-1495.
- [6] Chow, T.T., 2010, "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology", *Applied Energy*, 87, pp. 365-79.
- [7] Tripanagnostopoulos, Y., 2007, "Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems", *Solar Energy*, 81(9), pp. 1117-113.
- [8] Bloem, J.J., Lodi, C., Cipriano, J., and Chemisana, D., 2012, "An outdoor test reference environment for double skin applications of building integrated photovoltaic systems", *Energy Build.*, 50, pp. 63-73.
- [9] EkoeAkata, M.A., Njomo, D., and Mempo, B., 2015, "The effect of building integrated photovoltaic system (Bipvs) on indoor air temperatures and humidity (lath) in the tropical region of Cameroon", *Future Cities and Environment*, 1(1), DOI 10.1186/s40984-015-0002-y.
- [10] Mirzaei, P.A., and Carmeliet, J., 2015, "Influence of the underneath cavity on buoyant forced cooling of the integrated photovoltaic panels in building roof: A thermography study", *Progress in Photovoltaics*, 23(1), pp. 19-29.

- [11] Singh, A., Basak, P., Singh, J., Shehzad, M., 2016, "Modelling and Simulation of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System for Energy Efficient Buildings", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887).
- [12] Chow, T.T., Hand, J.W., and Strachan, P.A., 2003, "Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building", *ApplThermEng*, 23(16), pp. 2035–49.
- [13] Agathokleous, R. A., and Kalogirou S.A., 2016. "Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaics (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics", *Renew Energ.*, 89, pp. 743-756.
- [14] Lu, L., and Law, K.M., 2013, "Overall energy performance of semi-transparent single glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong", *Renewable Energy*, 49, pp. 250–254.
- [15] Li, H., Cao, C., Feng, G., Zhang, R., and Huang, K., 2015, "A BIPV/T system design based on simulation and its application in integrated heating system", *Procedia Eng.* 121, pp. 1590–1596.
- [16] Ong, K.S., 2003, "A mathematical model of a solar chimney", *Renewable Energy*, 28, pp. 1047–1060.
- [17] Çengel, Y.A., and Ghajar, A.J., 2011, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, McGraw-Hill, New York.
- [18] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 2013, *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, New Jersey, 4th Edition.
- [19] Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, Th., and Kittas, C., 2017, "Numerical study of mechanically ventilated broiler house equipped with evaporative pads", in press *Computers and Electronics in Agriculture*, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.016>

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΑΕΡΑ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

Αικατερίνη Λιλλιή^{1*}, Διονυσία Κολοκοτσά¹

^{1*} Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης,

¹ Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης,
E-mail: katerina.lilli.a@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ενός γεωθερμικού συστήματος. Πρόκειται για έναν εναλλάκτη θερμότητας εδάφους/αέρα (earth to air heat exchanger), τεχνολογία που επιλέχθηκε τόσο λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση της γεωθερμίας όσο και λόγω της ύπαρξης κατάλληλου δικτύου υπογείων αγωγών στο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με τη χρήση λογισμικών όπως το EnergyPlus και το Google Sketchup, πραγματοποιήθηκε πλήρης προσομοίωση και ενεργειακή ανάλυση του κτιρίου μελέτης. Εξαγόμενα αποτελέσματα που αφορούν τα διάφορα επίπεδα αποτελεσματικότητας του συστήματος παρουσιάζονται στη συνέχεια σε συγκριτικούς πίνακες και διαγράμματα.

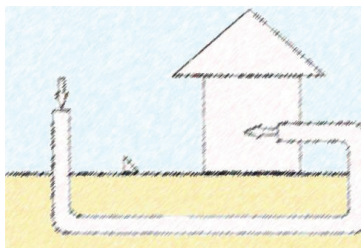
Λέξεις Κλειδιά: γεωθερμικό σύστημα, εναλλάκτης θερμότητας εδάφους/αέρα, γεωεναλλάκτης ανοικτού κυκλώματος, εξοικονόμηση ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πανεπιστημιούπολεις μπορούν να θεωρηθούν μικρές πόλεις λόγω του μεγέθους τους, των χρηστών και των μικτών σύνθετων δραστηριοτήτων τους. Το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο που προκαλούν μέσω των δραστηριοτήτων διδασκαλίας και έρευνας, καθώς και η παροχή υπηρεσιών υποστήριξης, θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά με μια αποτελεσματική επιλογή οργανωτικών και διαχειριστικών μέτρων [1]. Δεδομένου ότι τα φυσικά εδάφη των πανεπιστημιούπολεων αντικαθίστανται από τεχνητές επιφάνειες και κτίρια με ανεπιθύμητες θερμικές επιδράσεις, είναι δυνατή η υπερθέρμανση από την απελευθέρωση της ανθρώπινης ενέργειας και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από σκοτεινές επιφάνειες και κτίρια. Παρ' όλα αυτά η σπατάλη ενέργειας σε αίθουσες διδασκαλίας, χώρους εργασίας (γραφεία, εργαστήρια, αίθουσες υπολογιστών κλπ.) ή σε κατοικίες (κοιτώνες) μπορεί να αντιμετωπιστεί. [2].

Προς το σκοπό αυτό, η ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών που επιτρέπουν τη χρήση βιώσιμων εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι όλο και πιο εμφανής. Κάποιες από τις τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν τη δυνατότητα του εδάφους να λειτουργεί ως δεξαμενή ενέργειας που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Μέσω αυτών των συστημάτων, που ονομάζονται γεωθερμικοί εναλλάκτες, ο αέρας ψύχεται κατά το καλοκαίρι και θερμαίνεται το χειμώνα. Σε συνδυασμό με άλλα παθητικά συστήματα και επαρκή θερμικό σχεδιασμό του κτιρίου, οι εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή κλιματιστικών μονάδων σε κτίρια, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου[3], [4]. Βιβλιογραφικά έχουν παρουσιαστεί αρκετές στρατηγικές σχεδιασμού και υπολογιστικές μέθοδοι με χρήση γεωεναλλακτών [5]–[7] [8][9].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος γεωθερμίας, το οποίο εφαρμόστηκε σε κτίριο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το σύστημα αυτό αποτελεί έναν εναλλάκτη θερμότητας εδάφους/αέρα (earth to air heat exchanger) (Εικόνα 1), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν ως αγωγοί τα υπόγεια περάσματα του Πολυτεχνείου έναντι των συμβατικών αγωγών μεταφοράς θερμότητας. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε το δίχως άλλο να αποτελέσει πρότυπο σύστημα για κτίρια με παρόμοια χαρακτηριστικά. Με τη βοήθεια ενός μηχανικού συστήματος ο ατμοσφαιρικός αέρας οδηγείται στο κτίριο, αφού έχει ψυχθεί ή θερμανθεί καθώς διαπερνά το δίκτυο αγωγών (earth tubes). Οι θερμοκρασία του υπεδάφους (σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους), το μήκος, η ακτίνα, το βάθος εγκατάστασης και το υλικό του αγωγού, αποτελούν τους πλέον κρίσιμους παράγοντες γι' αυτό και εξετάστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 1. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση εξεταζόμενου συστήματος

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Μοντελοποίηση κτιρίου

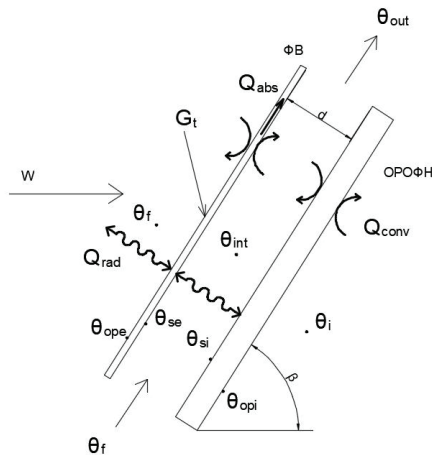
Οι βασικές εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης, στις οποίες περιλαμβάνεται το υπό μελέτη κτίριο, βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της πόλης των Χανίων και συγκεκριμένα σε απόσταση 6 περίπου χιλιομέτρων βορειοανατολικά του κέντρου της πόλης (Εικόνα 2). Η Πολυτεχνειούπολη βρίσκεται σε υψόμετρο 137m από την επιφάνεια της θάλασσας και καταλαμβάνει έκταση εμβαδού 2.900m², περίπου.

συνθήκες. Αρχικά αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο energy balance για την μελέτη των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση της καλυμμένης με ΦΒ βιομηχανικής στέγης. Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της κάλυψης της στέγης με φωτοβολταϊκά με βάση μετρήσεις της ροής θερμότητας από το τμήμα της καλυμμένης και το τμήμα της γυμνής στέγης και εντοπίστηκε η εξάρτηση της συμπεριφοράς κάθε τμήματος από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Τέλος εξετάστηκε το μικροκλίμα σε όλο το θάλαμο και κοντά στην οροφή με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Αναλυτικό μοντέλο

Η βασική γεωμετρία που περιγράφει το πρόβλημα του υπολογισμού της ροής θερμότητας διαμέσου οροφής καλυπτόμενης από ΦΒ δίνεται στην Εικόνα 1. Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή θερμότητας, φ_{si} , προς το εσωτερικό του θαλάμου αναπτύσσεται το εξής αναλυτικό μοντέλο αποτελούμενο από τρεις εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου[8] και βοηθητικές σχέσεις.



Εικόνα 1: Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα σε ΦΒ και στέγη

Το ισοζύγιο ενέργειας μέσα στο διάκενο αέρα δίνεται από την εξίσωση (1) ακολούθως

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (\theta_{out} - \theta_f) = A \cdot h_{cv1} \cdot (\theta_{se} - \theta_{int}) + A \cdot h_{cv2} \cdot (\theta_{si} - \theta_{int}) \quad (1)$$

Όπου, \dot{m} , η παροχή αέρα στο διάκενο [kg/s], θ_f , η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα [°C], θ_{out} , η θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται ο αέρας από το διάκενο [°C], A , η επιφάνεια του ΦΒ [m²], h_{cv1} , ο συντελεστής συναγωγής με την επιφάνεια του ΦΒ [W/(m²K)], h_{cv2} , ο συντελεστής συναγωγής με την επιφάνεια της οροφής [W/(m²K)], θ_{int} , η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο διάκενο [°C], θ_{se} , η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του ΦΒ [°C] και θ_{si} , η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής [°C].

Το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια του διακένου που είναι σε επαφή με το ΦΒ περιγράφεται από την εξίσωση (2) που ακολουθεί

$$\varphi_{se} = \frac{\theta_{ope} - \theta_{se}}{R_{e^*}} + N_i^* \cdot a_{est} \cdot G_t = \frac{\theta_{se} - \theta_{int}}{R_{cv}} + \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{R_{rd}} \quad (2)$$

Όπου, φ_{se} , η ροή θερμότητας διαμέσου του ΦΒ, θ_{ope} , η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του ΦΒ [°C], R_{e^*} , η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας διαμέσου του ΦΒ [m²K/W], N_i^* , ο συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας [-], a_{est} , ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας του ΦΒ [-], G_t , η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του ΦΒ [W/m²], R_{cv} , η θερμική αντίσταση συναγωγής ανάμεσα στο ΦΒ και το διάκενο αέρα [(m²K)/W] και R_{rd} , η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας ανάμεσα στο ΦΒ και την οροφή [(m²K)/W].

Τα δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου K3 παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1). Οι τοίχοι αποτελούνται, από μέσα προς τα έξω, από διπλή γυψοσανίδα πάχους 12mm η μία, μόνωση πάχους 5cm (εξηλασμένη πολυστερίνη) και τσιμεντοσανίδα πάχους 12mm. Η οροφή του ισογείου και του πρώτου ορόφου αποτελείται από μη επιχρισμένο σκυρόδεμα πάχους 2cm και κεραμικά πλακάκια 10mm. Η οροφή του δεύτερου ορόφου, που βρίσκεται ο μη θερμαινόμενος χώρος αποτελείται από μη επιχρισμένο σκυρόδεμα πάχους 2cm, μόνωση πάχους 10cm και ασφαλτόπανο πάχους 10mm. Τέλος τα δάπεδα αποτελούνται στη πλειοψηφία τους από μάρμαρο (διάδρομοι και γραφεία), και σε ορισμένους χώρους από βιομηχανικό δάπεδο (εργαστήρια) και κεραμικό πλακάκι (τουαλέτες και γραφεία). Τα παράθυρα αποτελούνται από διπλούς υαλοπίνακες με πλαίσια αλουμινίου και εσωτερικές ρυθμιζόμενες περσίδες. Το υπό μελέτη κτίριο στεγάζει όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κυρίως γραφεία, εργαστήρια και αίθουσες υπολογιστών. Στην υπολογιζόμενη ισχύ από τον εξοπλισμό περιλαμβάνονται εξοπλισμός γραφείων, υπολογιστές, scanner, εκτυπωτές, ηλεκτρικές συσκευές και εξοπλισμός εργαστηρίων. Ο φωτισμός των χώρων καλύπτεται από ράβδους φθορισμού τύπου T18 των 18W.

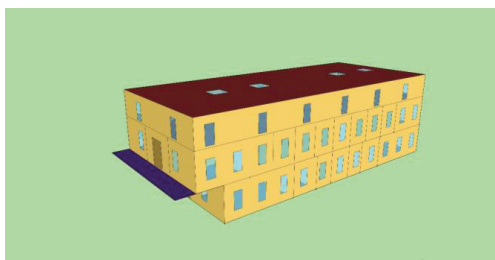
Πίνακας 1: Δομικά χαρακτηριστικών του κτιρίου K3 (αναφορά από πάνω προς τα κάτω και από έξω προς τα μέσα).

Στρώσεις υλικών	Πυκνότητα [kg/m ³]	Πάχος [m]	Συντελ.Λ [W/mK]	Θερμοχωρητικότητα [J/(KgK)]
Δάπεδο ισογείου				
Μάρμαρο	2800	0,02	3,48	1000
Τσιμεντοκονίαμα	1800	0,02	0,87	1000
Γαρμπιλόδεμα (B225)	1500	0,05	1,1	1000
Στεγανωτική μεμβράνη	1050	0,01	0,17	1100
Ελαφρά οπλισμένη πλάκα σκυροδέματος	2400	0,2	2,03	1000
Δάπεδο 1 ^{ου} ορόφου				
Μάρμαρο	2800	0,02	3,48	1000
Τσιμεντοκονίαμα	1800	0,02	0,87	1000
Γαρμπιλόδεμα	2400	0,05	0,64	1000
Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος	2400	0,15	2,03	1000
Μονωτικό υλικό	50	0,07	0,04	840
Επίχρισμα	1900	0,02	0,87	
Εξωτερικός τοίχος ισογείου				
Γυψοσανίδα	1000	0,012	0,58	1000
Μονωτικό Υλικό	25	0,05	0,04	840
Σκυρόδεμα – Τοίχιο εμφανούς σκυροδέματος (B225)	2400	0,15	2,03	1000
Εξωτερικός τοίχος 1ου ορόφου				
Τσιμεντοσανίδα	1100	0,012	0,58	1000
Μονωτικό υλικό	25	0,05	0,04	840

Γυψοσανίδα	1200	0,012	0,58	1000
Παράθυρα				
Διπλοί υαλοπίνακες	2500	0,01	1,00	750
Πλαίσιο αλουμινίου	2800	0,044	160,0	880

Το υπό μελέτη κτίριο στεγάζει όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κυρίως γραφεία, εργαστήρια και αίθουσες υπολογιστών. Στην υπολογιζόμενη ισχύ από τον εξοπλισμό περιλαμβάνονται εξοπλισμός γραφείων, υπολογιστές, scanner, εκτυπωτές, ηλεκτρικές συσκευές και εξοπλισμός εργαστηρίων. Ο φωτισμός των χώρων καλύπτεται από ράβδους φθορισμού τύπου T18 των 18W.

Η προσομοίωση της γεωμετρίας του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος SketchUp, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη τρισδιάστατη αποτύπωση του κτιρίου (Εικόνα 5) ενώ στη συνέχεια με τη χρήση του λογισμικού ανάλυσης EnergyPlus [10] εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά ολόκληρου του κελύφους της κατασκευής, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης καθώς και δεδομένα που αφορούν την υπάρχουσα κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου. Ιδιαίτερη μέριμνα υπήρξε κατά την προσομοίωση του ήδη υπάρχοντος συστήματος ψύξης/θέρμανσης VRF (Variable Refrigerant Flow) ως προς το οποίο ο γεωθερμικός εναλλάκτης λειτουργεί υποστηρικτικά. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα σύστημα κλιματισμού μεταβλητού όγκου ψυκτικού μέσου και περιλαμβάνει την εξωτερική μονάδα (αντλία θερμότητας), η οποία συνδέεται με πολλαπλές εσωτερικές μονάδες μέσω ενός κεντρικού δικτύου ψυκτικών σωληνώσεων. Στο σύστημα κυκλοφορεί ψυκτικό υπό μορφή αερίου και υγρού, το οποίο χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας βάσει του μικτού κύκλου του μοντέλου της αντλίας θερμότητας. Βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων VRF είναι η υψηλή τους απόδοση, η εύκολη εγκατάστασή τους καθώς και ότι μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ αποδοτικά μεταβλητά φορτία. Ο συντελεστής απόδοσης θέρμανσης, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, τέθηκε 1,55 ενώ ο συντελεστής απόδοσης ψύξης 1,4.



Εικόνα 5. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου K3

Κάθε όροφος χωρίζεται σε διαφορετικό αριθμό θερμικών ζωνών ανάλογα από το προφίλ των ηλιακών κερδών, τον προσανατολισμό, την χρήση του εκάστοτε χώρου καθώς και την επιφάνεια με την οποία συνορεύουν (αέρας, έδαφος κτλ.). Πιο συγκεκριμένα το ισόγειο χωρίζεται σε έξι (6) θερμικές ζώνες, ο 1ος όροφος σε έξι (6) και ο 2ος αποτελεί ολόκληρος μία θερμική ζώνη.

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου υφιστάμενης κατάστασης έγινε στα πλαίσια του προγράμματος CAMPIT [11].

2.2. Γεωεναλλάκτης εδάφους/ αέρα – Earth Tube

Στο σημείο αυτό έγινε η προσομοίωση των υπόγειων αγωγών. Πρόκειται για υπόγειους διαδρόμους που συνδέουν τα κτίρια της Πολυτεχνειούπολης μεταξύ τους (Εικόνα 6). Προκειμένου να προσομοιωθεί η αυτόχρονη λειτουργία των δύο συστημάτων (Earth Tube - VRF), και λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές ιδιαιτερότητες του EnergyPlus, δημιουργήθηκε ξεχωριστό προσομοίωμα του κτιρίου μελέτης στο οποίο εισήχθη σε βάθος 3,2m ο γεωθερμικός, από σκυρόδεμα, αγωγός, ακτίνας 1m, πάχους 10 cm, και μήκους 80m.

Χρησιμοποιώντας το βοηθητικό πρόγραμμα CalcSoilSurfTemp [12] και τα κλιματικά δεδομένα από το δελτίο καιρού, προσδιορίστηκε αρχικά η μέση ετήσια θερμοκρασία υπεδάφους της περιοχής μελέτης,

και στη συνέχεια οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του εξερχομένου από το δίκτυο αγωγών αέρα, δεδομένο απαραίτητο για το επόμενο στάδιο της ανάλυσης. Τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού CalcSoilSurfTemp παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2). Οι τιμές επιλέχθηκαν βάση των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος και προτεινόμενων τιμών του EnergyPlus.

Πίνακας 2: Δεδομένα εισόδου λογισμικού CalcSoilSurfTemp, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών του αέρα που εξέρχεται από τους υπόγειους αγωγούς.

Παράμετροι	Εισαγόμενες τιμές
Ρυθμός ροής αέρα σχεδιασμού	0.1m ³ /s
Ελάχιστη θερμοκρασία ζώνης κατά τη ψύξη	-10 ⁰ C
Μέγιστη θερμοκρασία ζώνης κατά τη ψύξη	30 ⁰ C
Διαφορά θερμοκρασίας	0,1 ⁰ C
Τύπος earthtube	Εξαναγκασμένης εισαγωγής
Αύξηση της πίεσης του ανεμιστήρα	400Pa
Συνολική απόδοση ανεμιστήρα	0.9
Ακτίνα αγωγού	1m
Πάχος αγωγού	0.1m
Μήκος αγωγού	80m
Θερμική αγωγιμότητα αγωγού	1.73W/m ² K
Βάθος αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους	3,2m
Κατάσταση εδάφους	Ξηρό
Μέση θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους	18
Εύρος επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους	7,454
Σταθερά αλλαγής φάσης επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους	27
Συντελεστής σταθερής ροής	0,606
Συντελεστής θερμοκρασίας ροής	0,02
Συντελεστής ταχύτητας ροής	0,0006
Συντελεστής τετραγώνου ταχύτητας ροής	0

Μετά την πρόψυξη ή προθέρμανση του αέρα μέσω της διέλευσής του από τους υπόγειους αγωγούς, ο αέρας κατευθύνεται στην εξωτερική μονάδα του συστήματος VRF. Για την μοντελοποίηση αυτού του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία EMS (Energy Management System) του EnergyPlus [13]. Πρόκειται για μία από τις δυνατότητες για προχωρημένους χρήστες του EnergyPlus καθ' ότι παρέχει έναν τρόπο ανάπτυξης μεθόδων ελέγχου και δημιουργίας υπορουτινών που υπερβαίνουν τις τυπικές δυνατότητες του προγράμματος. Με τη δημιουργία κατάλληλου κώδικα εντολών, που βασίζεται στην γλώσσα προγραμματισμού EnergyPlus Runtime Language (Erl), ο χρήστης μπορεί να παρακάμψει τις συνήθεις διαδικασίες επίλυσης του προγράμματος, τροποποιώντας τη λειτουργία του προς την επιθυμητή κατεύθυνση προσομοίωσης.

Σε πρώτη φάση γράφτηκε κατάλληλο πρόγραμμα με το οποίο οι τιμές θερμοκρασίας που εξήχθησαν από το βοηθητικό πρόγραμμα στο προηγούμενο βήμα (CalcSoilSurfTemp) εισήχθησαν στο καινούριο μοντέλο. Στη συνέχεια κάνοντας χρήση του στοιχείου EMS:Actuator οι τιμές αυτές αντικαθιστούν τις τυπικές θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα που εισάγονται στον αντίστοιχο κόμβο εισαγωγής αέρα του κύριου συστήματος ψύξης/θέρμανσης του κτιρίου μελέτης. Αυτή η «παρακάμψη» αποτέλεσε ουσιαστικά τη διαδικασία πρόψυξης/προθέρμανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, πράγμα που αποτελεί και το βασικό στόχο αυτής της γεωθερμικής εφαρμογής.



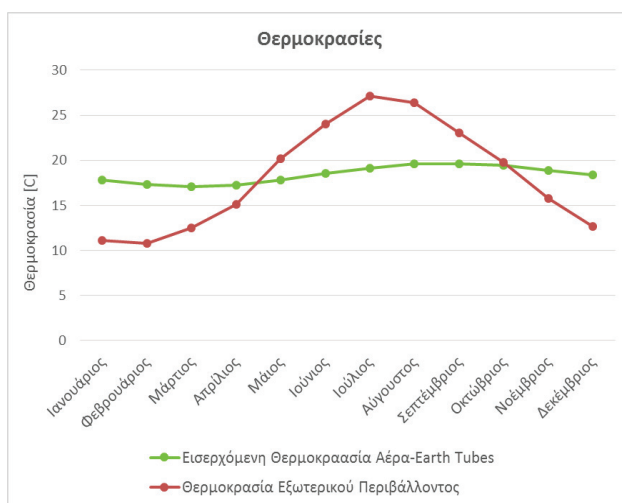
Εικόνα 6. Απεικόνιση των υπόγειων διάδρομοι που συνδέουν τα κτίρια της Πολυτεχνειούπολης

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αποτελέσματα κτιρίου μελέτης

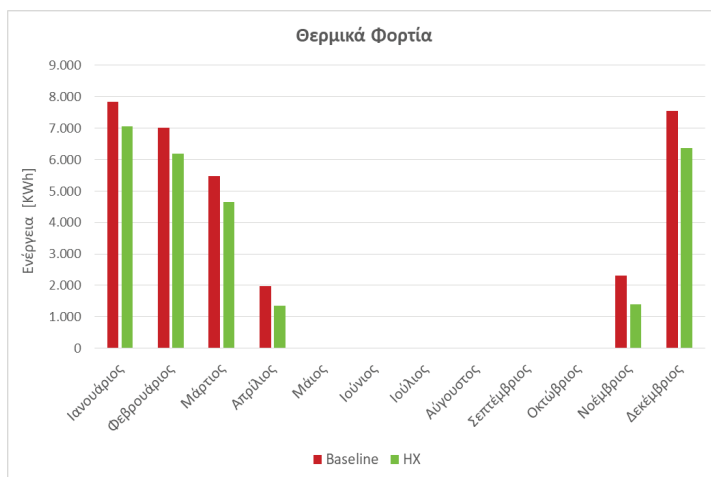
Στο εξής, χάριν συντομίας, η κατάσταση του υφιστάμενου κτιρίου στους παρακάτω πίνακες χαρακτηρίζεται ως Baseline, ενώ η μοντελοποίηση του κτιρίου με την προσθήκη των αγωγών (Earth Tubes) χαρακτηρίζεται ως EarthtoAir HX. Στα διαγράμματα αντιστοίχως παρουσιάζονται ως Baseline και HX.

Στις εικόνες 4 έως 6 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ του Baseline και του HX προσομοιώματος τόσο ως προς τις θερμοκρασίες του αέρα που χρησιμοποιείται για την θέρμανση και ψύξη του κτιρίου όσο και ως προς τα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία. Στην εικόνα 7 παρατίθενται οι τιμές των εξοικονομούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων.

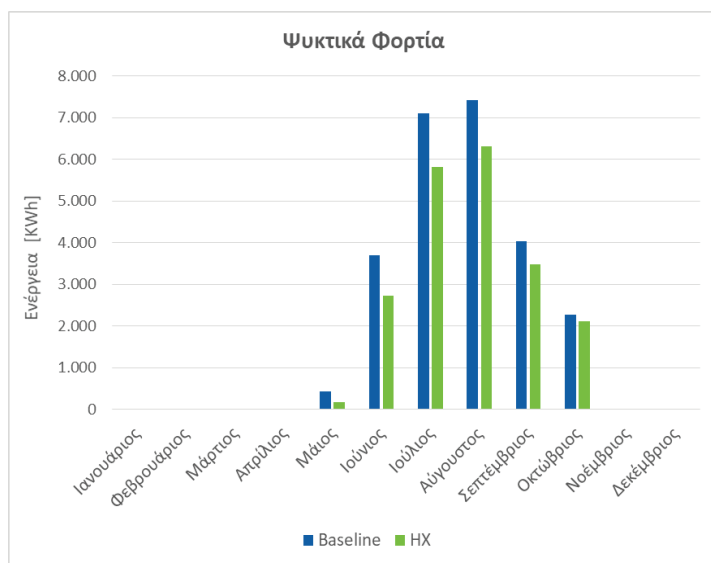


Εικόνα 4. Σύγκριση της θερμοκρασίας του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στο κτίριο μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)

Όπως διακρίνεται οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι σημαντικές τόσο τους χειμερινούς όσο και τους θερινούς μήνες, γεγονός που εξασφαλίζει ένα αρκετά μεγάλο ενεργειακό κέρδος. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ εξίσου σημαντικές είναι και οι διαφορές θερμοκρασίας τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, μικρότερο εύρος παρατηρείται τον Οκτώβριο, τον Απρίλιο και τον Μάιο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως το εξεταζόμενο σύστημα συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας κυρίως τους μήνες του έτους, στους οποίους έχουμε μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις.



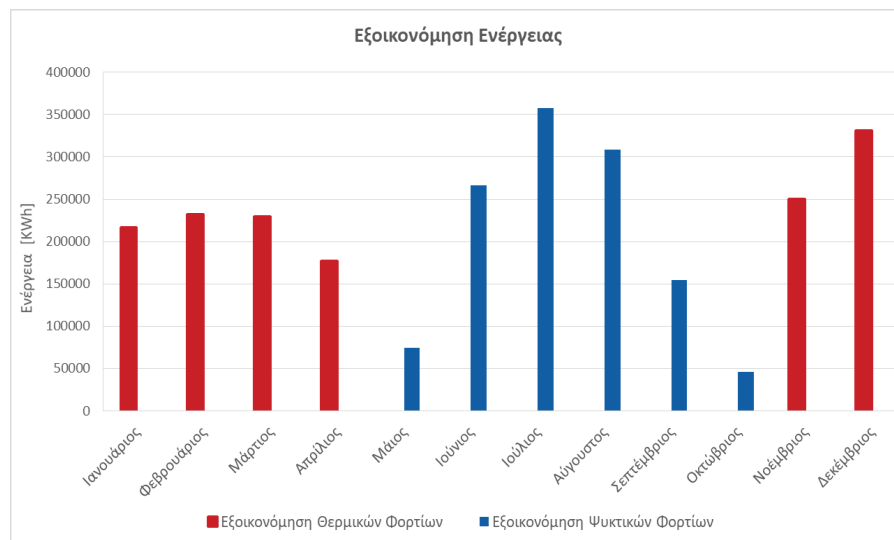
Εικόνα 5. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου



Εικόνα 6. Σύγκριση των απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η μέση μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας είναι περίπου στα 794.45kWh. Η μικρότερη εξοικονόμηση παρατηρείται τον μήνα Μάιο ενώ η μεγαλύτερη τον Ιούλιο, όπως ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με τις τιμές της θερμοκρασίας που εισήχθησαν κατά τη μοντελοποίηση. Στον παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 7) παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των εξοικονομούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Όπως διακρίνεται η εξοικονόμηση κατά τους θερινούς μήνες έχει σχετικά μεγαλύτερες τιμές από αυτές των χειμερινών μηνών. Παρόλα αυτά τους χειμερινούς μήνες φαίνεται να υπάρχει μία πιο σταθερή ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας. Η συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας στο υπό μελέτη κτίριο (Κ3) υπολογίστηκε στις 9518kWh που αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 19,93% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη. Το κύριο περιβαλλοντικό όφελος που προέρχεται από την ετήσια παραγωγή 9518kWh, είναι

η μείωση των αέριων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 5.74 τόνους. Για τον υπολογισμό αυτό θεωρήθηκε ότι οι πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογονάνθρακες εκπέμπουν 0.603kg CO₂ ανά kWh [14].



Εικόνα 7. Εξοικονομούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία μετά την εφαρμογή του υπό μελέτη EarthtoAir ΗΧ μοντέλου

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μοντελοποίηση του εξεταζόμενου συστήματος στο κτίριο μελέτης (Κ3) είναι τα εξής:

- οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι σημαντικές τόσο τους χειμερινούς όσο και τους θερινούς μήνες, γεγονός που εξασφαλίζει ένα αρκετά μεγάλο ενεργειακό κέρδος
- η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος είναι 7.95°C ενώ η μικρότερη 0,3°C
- οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ εξίσου σημαντικές είναι και οι διαφορές θερμοκρασίας τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, μικρότερο εύρος παρατηρείται τον Οκτώβριο, τον Απρίλιο και τον Μάιο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως το εξεταζόμενο σύστημα συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας κυρίως τους μήνες του έτους, στους οποίους έχουμε μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις
- η μέση μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας είναι περίπου στα 794.45KWh
- η μικρότερη εξοικονόμηση παρατηρείται τον μήνα Μάιο ενώ η μεγαλύτερη τον Ιούλιο
- η συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας στο υπό μελέτη κτίριο (Κ3) υπολογίστηκε στις 9518 kWh
- το κύριο περιβαλλοντικό όφελος που προέρχεται από την ετήσια παραγωγή 9518 kWh, είναι η μείωση των αέριων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 5.74 τόνους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. M. Alshuwaikhat and I. Abubakar, "An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 16, pp. 1777–1785, 2008.
- [2] Wong Nyuk Hien, S. Jusuf, A. La Win, A. & K. Thu, H. & S. Negara, and T. & X. Wu, "Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics.," *Build. Environ. - BLDG Env.*, vol. 42, pp. 2949–2970, 2007.
- [3] M. Santamouris and D. Kolokotsa, "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art," *Energy Build.*, vol. 57, no. 0, pp. 74–94, Feb. 2013.
- [4] M. Santamouris and D. Kolokotsa, *Passive cooling of buildings: Present and future needs: Recent progress on passive cooling convective technologies*. 2016.
- [5] R. Kumar, A. R. Sinha, B. K. Singh, and U. Modhukalya, "A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 2282–2288, 2008.
- [6] R. Kumar, S. C. Kaushik, and S. N. Garg, "Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 10, pp. 1139–1155, 2006.
- [7] M. Maerefat and A. P. Haghighi, "Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2316–2324, 2010.
- [8] J. Vaz, M. A. Sattler, E. D. Dos Santos, and L. A. Isoldi, "Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger," *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2476–2482, 2011.
- [9] M. De Paepe and A. Janssens, "Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers," vol. 35, pp. 389–397, 2003.
- [10] EnergyPlus U.S. Department of Energy, "Energy, Plus, Getting Started." 2017.
- [11] D. Kolokotsa et al., "Development of a web based energy management system for University Campuses: The CAMP-IT platform," *Energy Build.*, vol. 123, pp. 119–135, 2016.
- [12] EnergyPlus U.S. Department of Energy, "Energy Plus, Input Output Reference, Zone Earth Tube (Earth Tube)." pp. 605–609, 2017.
- [13] EnergyPlus U.S. Department of Energy, "Energy Plus, EMS Application Guide." pp. 7, 37–38, 2017.
- [14] T. Tsoutsos, *Renewable energy sources, Environmental analysis of RES*. 2005.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΦΟΙΤΗΤΙΚΕΣ ΕΣΤΙΕΣ ΞΑΝΘΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ REUNI

Π.Ν. Μπότσαρης¹, Κ.Α. Λυμπερόπουλος^{1*}, Π. Γκιούρκα¹, Π. Μπεκάκος¹, Π.
Πιστοφίδης¹, Α. Πεχτελίδης¹

¹Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών
Παραγωγής & Διοίκησης, Τ.Κ. 67100, Ξάνθη
e-mail: klympero@pme.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τις δράσεις που υλοποιήθηκαν στο έργο ενσωμάτωσης τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα έντεκα (11) κτίρια των Φοιτητικών Εστίων του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης στην Πανεπιστημιούπολη Ξάνθης, συνολικής δομημένης επιφάνειας 14.819,09 m² και δυναμικότητας έως 630 φοιτητών. Το έργο υλοποιήθηκε από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης στο πλαίσιο του προγράμματος ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014, Χρηματοδοτικός Μηχανισμός Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (Θεματική Περιοχή: GR03-Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας). Το έργο επιδιώκει την άμβλυση των κοινωνικών και οικονομικών ανισοτήτων μέσω της εξασφάλισης βέλτιστων συνθηκών θερμικής άνεσης με χρήση ΑΠΕ σε κτίρια κοινωνικής κατοικίας, όπως οι φοιτητικές εστίες. Οι παρεμβάσεις ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας υλοποιήθηκαν σε κτίρια τα οποία περιλαμβάνουν οκτώ (8) υφιστάμενα κτίρια φοιτητικών κατοικιών, ένα (1) αμφιθέατρο, ένα (1) εστιατόριο που εξυπηρετεί τις φοιτητικές εστίες και ένα (1) κτίριο Ενεργειακού Κέντρου. Η εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ στην «Κοινότητα» του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης περιλαμβάνει:

- Υβριδικό σταθμό λέβητα βιομάζας / ηλιακών συλλεκτών συνολικής ισχύος 2,3 MW_{th} για θέρμανση, ψύξη και ΖΝΧ των κτιρίων των φοιτητικών κατοικιών και του αμφιθεάτρου
- Σύστημα αβαθούς γεωθερμίας ισχύος 225 kW_{th} και κεντρική κλιματιστική μονάδα για ψύξη, θέρμανση και ΖΝΧ του κτιρίου του εστιατορίου
- Αυτόνομο Φ/Β σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 51,48 kWp για μερική κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων κτιρίου φοιτητικής κατοικίας
- Σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών ποδηλάτων με χρήση φωτοβολταϊκής ενέργειας,
- Αυτόνομο αιολικό σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών ποδηλάτων με μικρή Α/Γ ισχύος 1 kW

Η «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ. αποτελεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα συνεργατικής παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Η υλοποίηση αποκεντρωμένων συστημάτων συνεργατικής παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελεί βασική προτεραιότητα στην στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την Ενεργειακή Ένωση. Η υλοποίηση του έργου REUNI συμβάλλει προς αυτή την κατεύθυνση και αναμένεται να αποτελέσει σημαντική μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή αντίστοιχων συστημάτων στην Ελλάδα και λοιπές χώρες της Μεσογείου.

Λέξεις Κλειδιά: Βιομάζα, ηλιακή ενέργεια, γεωθερμία, φωτοβολταϊκά, αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πράξη «Η συμβολή των ΑΠΕ στη βιώσιμη ανάπτυξη και λειτουργία του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης - Δημιουργία μιας αιεφόρου Κοινότητας» με ακρωνύμιο «REUNI» υλοποιήθηκε από το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης με χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014, Χρηματοδοτικός Μηχανισμός Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (Ευρωπαϊκή Περιοχή: GR03 - Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) με συνολικό προϋπολογισμό 1.800.365,78 Ευρώ. Η Πράξη “REUNI” συμβάλλει στην υλοποίηση επιδεικτικών έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ελλάδα, και ειδικά στην απομακρυσμένη περιοχή της Θράκης δημιουργώντας πυλώνα πράσινης ανάπτυξης, στο πλαίσιο των υποχρεώσεων της Ελλάδας για την προστασία ενάντια στην Κλιματική Αλλαγή. Επίσης, επιδιώκει την άμβλυση των κοινωνικών και οικονομικών ανισοτήτων μέσω της εξασφάλισης βέλτιστων συνθηκών θερμικής άνεσης με χρήση ΑΠΕ σε κτίρια κοινωνικής κατοικίας, όπως οι φοιτητικές εστίες. Οι παρεμβάσεις ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας υλοποιήθηκαν σε κτίρια της «Κοινότητας» του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, τα οποία περιλαμβάνουν οκτώ (8) υφιστάμενα κτίρια φοιτητικών κατοικιών με κωδική ονομασία Α1, Α2, Β1, Β2, Β3, Γ1, Γ2, Δ1, Δ2, ένα (1) αμφιθέατρο (ΑΜΦ), ένα (1) εστιατόριο (ΕΣΤ) που εξυπηρετεί τις φοιτητικές εστίες και ένα (1) κτίριο Ενεργειακού Κέντρου (ΕΚ). Η «Κοινότητα» βρίσκεται στην πανεπιστημιούπολη της πολυτεχνικής σχολής στα Κιμμέρια της Ξάνθης, στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης.

2. «ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ» Δ.Π.Θ. ΠΡΟ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ

2.1. Τοπογραφία θέσης κτιριακού συγκροτήματος

Το κτιριακό συγκρότημα βρίσκεται στο 3 χλμ Ξάνθης – Κιμμερίων, βορειοανατολικά από το κέντρο της πόλης της Ξάνθης, βόρεια της πανεπιστημιούπολης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης. Το συνολικό εμβαδόν της ιδιόκτητης έκτασης του ΔΠΘ είναι 1.354.338,43 m². Η εικόνα 1 παρουσιάζει δορυφορική εικόνα της έκτασης και του συνόλου των κτιρίων που αποτελούν την «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ.



Εικόνα 1. Δορυφορική εικόνα των κτιρίων της «Κοινότητας» ΔΠΘ (πηγή: Google earth)

2.2. Περιγραφή κτιριακού συγκροτήματος

Το κτιριακό συγκρότημα κατασκευάστηκε σε δύο φάσεις, όπως αποτυπώνεται από τις δύο οικοδομικές άδειες που ελήφθησαν το 1988 και το 1997. Τα οκτώ (8) κτίρια φοιτητικών εστιών περιλαμβάνουν 668 φοιτητικά διαμερίσματα συνολικών κλινών 592 (535 διαμερίσματα ενός ατόμου, 24 διαμερίσματα δύο ατόμων και 9 διαμερίσματα για ΑμεΑ). Στο κτίριο του Ενεργειακού Κέντρου είναι εγκατεστημένος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός παροχής θέρμανσης και ψύξης για τα κτίρια της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ., εκτός του κτιρίου του Εστιατορίου, το οποίο διαθέτει ξεχωριστό σύστημα θέρμανσης και παραγωγής ΖΝΧ σε λεβητοστάσιο εντός του κτιρίου του Εστιατορίου. Ο πίνακας 1 δίνει την επιφάνεια κάθε κτιρίου του κτιριακού συγκροτήματος.

Πίνακας 1. Εμβαδόν επιφάνειας κτιρίων της «Κοινότητας» ΔΠΘ

Όνομασία Κτιρίου	Επιφάνεια (m ²)
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_A1	1.352,72
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_A2	1.188,01
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_B1	1.869,63
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_B2	1.267,51
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_Γ1	1.352,72
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_Γ2	1.188,01
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_Δ1	1.869,63
Κτίριο Φοιτητικής Εστίας ΦΕ_Δ2	1.267,51
Κτίριο αμφιθέατρου ΦΕ_ΑΜΦ	1.941,21
Εστιατόριο Φοιτητικών Εστιών ΦΕ_ΕΣΤ	1.012,36
Κτίριο Ενεργειακού Κέντρου Φοιτητικών Εστιών ΦΕ_ΕΚ	509,78
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	14.819,09

Τα κτίρια της «Κοινότητας» είναι κατασκευασμένα από φέροντα οργανισμό σκυροδέματος με μόνωση υαλοβάμβακα 50 mm και νευρομετάλλ και διπλή δρομική - ορθοδρομική τοιχοποιία οπτοπλινθοδομής με υαλοβάμβακα 50 mm ενδιάμεσα. Τα δάπεδα επάνω από τους μη θερμαινόμενους χώρους (ΜΘΧ) αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος, γυψοσανίδα και υαλοβάμβακα 50 mm. Τα δάπεδα επάνω από το έδαφος αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος, μαρμαρίνη επικάλυψη και υαλοβάμβακα 50 mm. Η οροφή των κτιρίων είναι από πλάκα σκυροδέματος με υαλοβάμβακα 60 mm κάτω από μπετόν κλίσεως, ενώ φέρουν βυζαντινά κεραμίδια. Τα ανοίγματα των κτιρίων αποτελούνται από κουφώματα αλουμινίου συρόμενα χωρίς θερμοδιακοπή και δίδυμους απλούς υαλοπίνακες. Στο κτίριο του ενεργειακού κέντρου παρατηρούνται επιπλέον φεγγίτες με μονούς υαλοπίνακες. Η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων των κτιρίων της «Κοινότητας» είναι 2.101,40 m².

Η θέρμανση των κτιρίων της «Κοινότητας», εκτός του κτιρίου του Εστιατορίου, γίνεται μέσω κεντρικής εγκατάστασης θέρμανσης, η οποία βρίσκεται στο Ενεργειακό Κέντρο και περιλαμβάνει τρεις (3) μονάδες λέβητα-καυστήρα πετρελαίου υψηλών θερμοκρασιών (90°/70°C) (δύο από αυτούς ιδιοκτησίας του ΙΝΕΔΙΒΙΜ και ένας του Δ.Π.Θ.) ισχύος 1.163 kW έκαστη (δύο σε λειτουργία – ένας εφεδρικός). Στο εστιατόριο υπάρχει μονάδα λέβητα-καυστήρα πετρελαίου υψηλών θερμοκρασιών (90°/70°C) ισχύος 395,42 kW. Η διανομή της θερμότητας στα κτίρια γίνεται μέσω σωληνώσεων σε υπόγεια κανάλια τα οποία οδεύουν στον περιβάλλοντα χώρο της «Κοινότητας». Οι δύο από τους τρεις λέβητες του Ενεργειακού Κέντρου είναι τύπου ΠΥΡΚΑΛ, κατασκευής 2006 και 2010, ενώ ο τρίτος είναι τύπου RAYOM (Αντ. Σαχωλαριδής Α.Β.Ε.Ε.), κατασκευής 1991. Οι καυστήρες είναι τύπου R.B.L. 662 T1 για λειτουργία από 948-1540 kW και κατανάλωσης καυσίμου 80-130 kg/h. Η διανομή της θέρμανσης προς τα κτίρια της «Κοινότητας» γίνεται με υπόγεια δίκτυα σωληνώσεων χωρίς θερμομόνωση. Για την κυκλοφορία του θερμού νερού αξιοποιούνται τέσσερις (4) κυκλοφορητές κατάλληλης ισχύος και παροχής. Οι θερμικές μονάδες στα κτίρια των εστιών είναι θερμαντικά σώματα τύπου panel, ενώ στο εστιατόριο και στο αμφιθέατρο υπάρχουν επίσης Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες (ΚΚΜ) και μονάδες ανεμιστήρα – στοιχείου (fancoils). Η θέρμανση στο κτίριο του εστιατορίου αποδίδεται μέσω Κεντρικής Κλιματιστικής Μονάδας κατασκευής Φυρογένης τύπου MEA 120, παροχής 20.400 m³/h, ψυκτικής απόδοσης 575,69 kW, θερμικής απόδοσης 1.442,12kW, κατασκευής 9/1989. Η ΚΚΜ βρίσκεται σε κακή κατάσταση, ενώ δεν φέρει κανένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Στο εστιατόριο υπάρχει μονάδα λέβητα-καυστήρα πετρελαίου υψηλών θερμοκρασιών ισχύος 395,42 kW.

Στην υφιστάμενη κατάσταση, η ψύξη χώρων αφορά μόνο τα κτίρια του Εστιατορίου και του Αμφιθέατρου και γίνεται και πάλι μέσω του Ενεργειακού Κέντρου και μέσω δύο (2) υδρόψυκτων ψυκτών νερού ισχύος 316,71 kW έκαστος με πύργο ψύξης και δύο συμπιεστές (έκαστος). Οι υδρόψυκτοι ψύκτες είναι τύπου TRANE, κατασκευής του 1991 και βρίσκονται σε κακή κατάσταση, όπως και οι πύργοι ψύξης. Η διανομή γίνεται μέσω σωληνώσεων στα υπόγεια κανάλια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η απόδοση της ψύξης γίνεται μέσω των Κεντρικών Κλιματιστικών Μονάδων και μονάδων fan-coil.

Για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) στην υφιστάμενη κατάσταση χρησιμοποιούνται οι μονάδες λέβητα-καυστήρα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μάλιστα, ο βαθμός απόδοσης κατά την θερινή λειτουργία είναι ιδιαίτερα χαμηλός (περίπου 45%). Σε κάθε κτίριο εστιών είναι εγκατεστημένο

ένα boiler χωρητικότητας 2.500 lt (εκτός από Β1 και Δ1 που είναι 4.000 lt). Το Εστιατήριο διαθέτει boiler χωρητικότητας 800 lt. Στα κτίρια των εσίων υπάρχει ανακυκλοφορία του ΖΝΧ.

2.3. Κατανάλωση ενέργειας και ανθρακικό αποτύπωμα

Η κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης για τα έτη 2011, 2012 και 2013 δίνεται στον πίνακα 2. Τα διαθέσιμα πραγματικά στοιχεία περιλαμβάνουν την συνολική κατανάλωση του κτιριακού συγκροτήματος, αφαιρουμένου του κτιρίου του εστιατορίου, τα οποία έχουν κατανεμηθεί στα επιμέρους κτίρια σύμφωνα με τις θερμικές απώλειες κάθε κτιρίου. Από τη σύγκριση της κατανάλωσης πετρελαίου για κάθε έτος είναι εμφανής η επίπτωση της οικονομικής κρίσης και της αύξησης του ειδικού φόρου κατανάλωσης στα επίπεδα θερμικής άνεσης των χρηστών των εν' λόγω εγκαταστάσεων. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα πραγματικά στοιχεία, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του κτιριακού συγκροτήματος το 2012 ήταν ίση με 2.317,20 MWh.

Πίνακας 2. Καταναλώσεις πετρελαίου θέρμανσης κτιρίων για τα έτη 2011, 2012 και 2013

Κτίρια	2011		2012		2013	
	MWh	L	MWh	L	MWh	L
ΦΕ_A1	297,61	29760,68	172,53	17252,75	112,29	11228,78
ΦΕ_A2	240,77	24077,44	139,58	13958,08	90,84	9084,48
ΦΕ_B1	363,79	36379,21	210,90	21089,62	137,26	13725,97
ΦΕ_B2	238,07	23806,81	138,01	13801,20	89,82	8982,37
ΦΕ_Γ1	297,61	29760,68	172,53	17252,75	112,29	11228,78
ΦΕ_Γ2	240,77	24077,44	139,58	13958,08	90,84	9084,48
ΦΕ_Δ1	363,79	36379,21	210,90	21089,62	137,26	13725,97
ΦΕ_Δ2	238,07	23806,81	138,01	13801,20	89,82	8982,37
ΦΕ_ΑΜΦ	57,40	5740,21	33,28	3327,69	21,66	2165,80
ΦΕ_ΕΣΤ	569,00	56900,25	529,45	52945,20	515,75	51575,04
Σύνολο	2.906,89	290.688,75	1.884,76	188.476,20	1.397,84	139.784,04

Για τον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος γίνεται χρήση των συντελεστών μετατροπής σε ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που δίνονται στον Πίνακα Β.1. του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων [1]. Επίσης, το ανθρακικό αποτύπωμα της «Κοινότητας» υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και συγκεκριμένα τους συντελεστές μετατροπής όπως αυτοί δίνονται από το Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Σύμφωνα με το IPCC, οι εκπομπές CO_{2eq} για κάθε MWh_e καυσίμου είναι 1,167 τόνοι για την ηλεκτρική ενέργεια και 0,299 τόνοι για το πετρέλαιο θέρμανσης. Συνεπώς, το ανθρακικό αποτύπωμα της «Κοινότητας» υπολογίζεται σε 2.789,29 tηCO₂/y (μέθοδος ΚΕΝΑΚ), ή 3.267,72 tηCO₂/y (μέθοδος ΑΚΖ). Λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος μόνιμων ατόμων (εργαζόμενοι, φοιτητές) ίσο με 630 άτομα, το ανθρακικό αποτύπωμα ισούται με 5,18 τόνους CO₂ ανά άτομο (μέθοδος ΑΚΖ) και 4,42 τόνους CO₂ ανά άτομο (μέθοδος ΚΕΝΑΚ). Οι εν λόγω τιμές είναι απόλυτα συγκρίσιμες με τις τιμές που υπολογίζονται στο Σχέδιο Δράσεις Αειφορικής Ενέργειας και Κλίματος του Δήμου Ξάνθης (6 τόνοι CO₂ ανά κάτοικο).

3. «ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ» Δ.Π.Θ. ΜΕΤΑ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ

3.1. Στόχοι του έργου REUNI

Η «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ. αποτελεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα συνεργατικής παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας καθώς τα κτίρια που αποτελούν το κτιριακό συγκρότημα διαθέτουν κοινό σύστημα παραγωγής θέρμανσης και κοινό σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας. Η υλοποίηση αποκεντρωμένων συστημάτων συνεργατικής παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελεί βασική προτεραιότητα στην στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την Ενεργειακή Ένωση (Energy Union). Η υλοποίηση του έργου "REUNI" συμβάλλει προς αυτή την κατεύθυνση και αποτελεί σημαντική μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή αντίστοιχων συστημάτων στην Ελλάδα και λοιπές χώρες της Μεσογείου.

Το έργο «REUNI» στοχεύει στην αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιριακού συγκροτήματος κατά τουλάχιστον 50%, καθώς επίσης και στην μείωση των εκπομπών CO₂ κατά τουλάχιστον 20%. Η επίτευξη των στόχων συμβάλει

στην βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης και ποιότητας διαβίωσης των φοιτητών-ενοίκων, μειώνει το λειτουργικό κόστος των κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα συμβάλει στην ενημέρωση ευαισθητοποίηση των φοιτητών του Δ.Π.Θ. αλλά και των πολιτών της Ξάνθης αλλά και όλης της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης σε θέματα ΑΠΕ, ενεργειακής αποδοτικότητας και εξοικονόμησης ενέργειας.

Στις επόμενες παραγράφους της παρούσας ενότητας περιγράφονται τα συστήματα τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας που εγκαταστάθηκαν στο πλαίσιο του έργου REUNI. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, το έργο REUNI περιλαμβάνει την αξιοποίηση της βιομάζας, της ηλιακής ενέργειας, της γεωθερμικής ενέργειας και της αιολικής ενέργειας. Η πολυμορφία των εφαρμοζόμενων ΑΠΕ αποτέλεσε βασικό κριτήριο εκλογής των τεχνολογιών που εγκαταστάθηκαν στο πλαίσιο του έργου. Ταυτόχρονα, οι διαθέσιμες τεχνολογίες για την κάλυψη κυρίως των φορτίων θερμικής ενέργειας των κτιρίων αξιολογήθηκαν με τεchnο-οικονομικά κριτήρια. Το αυτόνομο Φ/Β σύστημα και η μικρή ανεμογεννήτρια που περιγράφονται παρακάτω επιλέχθηκαν για επιδεικτικούς λόγους.

3.2. Παρεμβάσεις ενσωμάτωσης τεχνολογιών ΑΠΕ

3.2.1. Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Στις στέγες των κτιρίων των φοιτητικών εστιών Γ2 και Δ1, τοποθετήθηκε φωτοβολταϊκό σύστημα συνολικής ισχύος 51,48 kWp και χωρητικότητας συστήματος αποθήκευσης 11.340 Ah (C120) (εικόνα 2). Τα κύρια μέρη του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος περιλαμβάνουν:

- Φωτοβολταϊκά πλαίσια SUNTECH STP260-20/Wem πολυκρυσταλλικού τύπου (198 τεμάχια)
- Σύστημα στήριξης φ/β πλαισίων σε κεραμοσκεπή από ανοδιωμένο αλουμίνιο της εταιρείας ALUMIL τύπου Helios Roof H2200-250
- Συσσωρευτές ενέργειας SUNLIGHT 2V 18 RES OPzS 3780 (72 τεμάχια)
- Μετατροπείς μικροδικτύου SMA Sunny Island 8.0H (3 τεμάχια)
- Αντιστροφεείς δικτύου SMA Sunny Tripower 25.000 TL (2 τεμάχια)
- Σύστημα αποθήκευσης δεδομένων και τηλεμετρίας SMA Cluster Controller (1 τεμάχιο)

Το φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέθηκε με φορτία φωτισμού κοινόχρηστων χώρων του ισογείου και του πρώτου ορόφου του κτιρίου Γ2, καλύπτοντας 100% τα εν λόγω ηλεκτρικά φορτία. Το εγκατεστημένο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτεί επίσης ένα σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών ποδηλάτων, ο οποίος διαθέτει 6 θέσεις φόρτισης και μεταλλικό στέγαστρο προστασίας με φωτισμό.



Εικόνα 2. Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα επί κεραμοσκεπής

3.2.2. Υβριδικό σύστημα βιομάζας/θερμικού ηλιακού συστήματος

Την καρδιά των παρεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν στην «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ. αποτελεί η εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος με εκμετάλλευση βιομάζας και ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ζεστού νερού με χρήση θερμικού ηλιακού συστήματος επίπεδων επιλεκτικού τύπου ηλιακών συλλεκτών και λέβητα βιομάζας και για την παραγωγή ψυχρού νερού με την χρήση ψύκτη απορρόφησης (εικόνα 3). Το υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει σύστημα σύντομης αποθήκευσης ζεστού νερού και λειτουργεί για την κάλυψη του συνόλου της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης (ZNX) των κτιρίων των Φοιτητικών Εστιών (εκτός του Εστιατορίου). Το εν λόγω αντικαθιστά πλήρως το υφιστάμενο συμβατικό σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας του κτιριακού συγκροτήματος (λέβητες πετρελαίου) για την κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης.

Το θερμικό ηλιακό σύστημα περιλαμβάνει τα κάτωθι κύρια μέρη:

- Ηλιακούς συλλέκτες επίπεδου επιλεκτικού τύπου εμβαδού μικτής επιφάνειας 1.888,56 m² της εταιρείας ECOSYSTEM τύπου EPI 54 PA (740 τεμάχια)
- Σύστημα στήριξης ηλιακών συλλεκτών στο έδαφος με πασσαλόμπηξη.

- Ηλιακό υγρό μίγματος νερού/γλυκόλης.
- Ηλιακούς σταθμούς της εταιρείας LME με εξωτερικούς πλακοειδείς εναλλάκτες της εταιρείας SWEP (4 τεμάχια)
- Δίκτυα σωληνώσεων ηλιακού πεδίου και μηχανοστασίου για σύνδεση με υφιστάμενα δίκτυα διανομής θερμότητας.
- Περίφραξη προστασίας του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών.
- Σύστημα επιτήρησης, ασφαλείας και φωτισμού του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών.
- Υδραυλικό εξοπλισμό όπως δοχεία διαστολής, βαλβίδες ασφαλείας, τριόδες βάνες, κλπ.
- Οικίσκο τύπου ISOBOX.

Το σύστημα του λέβητα βιομάζας περιλαμβάνει τα κάτωθι κύρια μέρη:

- Λέβητα-καυστήρα βιομάζας θερμικής ισχύος 1,15 MW_{th} της εταιρείας THERMOSSOL STEAMBOILERS S.A. τύπου HWA 1.150.
- Πολυκυκλωνικό φίλτρο ιπτάμενης τέφρας.
- Οικονομητήρα θέρμανσης νερού από τα εξερχόμενα καυσαέρια απόδοσης 50kW.
- Φίλτρο αποκονίωσης (σακόφιλτρο) για περιεκτικότητα σκόνης καυσαερίων στην καπνοδόχο <math><10\text{mg}/\text{Nm}^3</math>.
- Καπνοδόχο κατακόρυφη, κυλινδρική διαμέτρου D=640mm και ύψους 12m.
- Δεξαμενή αποθήκευσης στερεών βιοκαυσίμων χωρητικότητας 35 m³ που φέρει μεταλλικό σιλό και περιλαμβάνει κοχλία μεταφοράς.
- Ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου του συστήματος λέβητα βιομάζας.
- Λοιπό υδραυλικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

Το σύστημα σύντομης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελείται από κάθετα δοχεία αποθήκευσης χωρητικότητας 10 m³ έκαστο της εταιρείας THERMOSSOL που φέρουν εξωτερική μόνωση 100 mm. Για την παραγωγή ψύξης έχει εγκατασταθεί ένας ψύκτης απορρόφησης κλειστού τύπου ψυκτικής ισχύος 90RT της εταιρείας CARRIER τύπου 16LJ-A12 (εικόνα 4), ο οποίος συνοδεύεται από πύργο ψύξης του οίκου EVAPCO τύπου LSTE-5112 ψυκτικής ισχύος 720,5 kW. Για τον απομακρυσμένο έλεγχο του υβριδικού συστήματος έχει τοποθετηθεί κατάλληλο σύστημα εμποτίειας, ελέγχου και μετρήσεων (SCADA).



Εικόνα 3. Λέβητας βιομάζας (αριστερά), ηλιακό πεδίο (κέντρο), σύστημα αποθήκευσης ζεστού νερού και βιομάζας (δεξιά)

Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από τέσσερις (4) βρόγχους ισχύος (solar collectors loops) ισοδύναμης θερμικής ενέργειας. Κάθε βρόγχος αποτελείται από συστοιχίες πέντε ηλιακών συλλεκτών, οι οποίες συνδέονται παράλληλα σύμφωνα με την συνδεσμολογία “reverse-return” με στόχο την υδραυλική εξισορρόπηση. Ο προσανατολισμός των συστοιχιών των ηλιακών συλλεκτών είναι Νότιος (αζιμουθίο 0°) με απόκλιση +/- 3°. Η γωνία κλίσης των ηλιακών συλλεκτών ως προς το επίπεδο του εδάφους είναι 45°. Κάθε βρόγχος ηλιακών συλλεκτών ελέγχεται από μονάδα ελέγχου (solar kit), η οποία περιλαμβάνει έλεγχο της αντλίας με αυτόματη προσαρμογή της ταχύτητας για την διατήρηση σταθερής διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των ηλιακών συλλεκτών και των δοχείων αποθήκευσης (π.χ. μείωση της ταχύτητας της αντλίας σε συνθήκες συννεφιάς). Η μονάδα ελέγχου κάθε βρόγχου συνδέεται με το κεντρικό σύστημα SCADA του υβριδικού σταθμού. Για την αποφυγή του φαινομένου της στασιμότητας και της υπερθέρμανσης έχει εγκατασταθεί αυτοματισμός ο οποίος περιλαμβάνει νυχτερινή ψύξη, χρήση του ψύκτη απορρόφησης και του πύργου ψύξης καθώς επίσης και χρήση του λέβητα βιομάζας (ως εναλλάκτη) για την περαιτέρω ψύξη του νερού των δοχείων αποθήκευσης.

3.2.3. Σύστημα αβαθούς γεωθερμίας

Η συγκεκριμένη παρέμβαση αφορά την εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος κλειστού κυκλώματος με γεωθερμικό γεωεναλλάκτη κάθετων γεωτρήσεων (εικόνα 4) και την αντικατάσταση της υφιστάμενης κεντρικής κλιματιστικής μονάδας. Το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας λειτουργεί για την

κάλυψη του συνόλου της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης (ZNX) στο κτίριο του εστιατορίου της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ. Περιλαμβάνει τα κάτωθι κύρια μέρη:

- Γεωθερμικός γεωεναλλάκτης κάθετων γεωτρήσεων συνολικού μήκους 3.060 μέτρων (34 γεωτρήσεις βάθους 90 μέτρων έκαστη).
- Αντλίες θερμότητας CARRIER τύπου 30WG-090—0346-PE (2 τεμάχια) (εικόνα 4).
- Σωλήνες πολυαιθυλενίου PE-HD 16 σε σχήμα απλού U-tube (6.000 μέτρα).
- Δίκτυο μεταφοράς θερμότητας από τον γεωεναλλάκτη στις γεωθερμικές αντλίες.
- Δίκτυο σωληνώσεων από τις γεωθερμικές αντλίες στις καταναλώσεις.
- Αντλία πρωτεύοντος δικτύου / Αντλία δευτερεύοντος δικτύου.
- Δικλείδες & Διακόπτες Ροής (Βάνες).
- Φίλτρα, Βαλβίδες Αντεπιστροφής, Αυτόματο Πλήρωσης, Μανόμετρα / Θερμόμετρα, Αυτόματα Εξαεριστικά, δοχεία διαστολής.
- Δοχείο αδρανείας χωρητικότητας 1.000 L.
- Δοχείο αποθήκευσης ZNX χωρητικότητας 1.500 L τύπου SOLAIRE TITANE.
- Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα του οίκου NOVAIR τύπου CTA 180.



Εικόνα 4. Ψύκτης απορρόφησης (αριστερά), γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (κέντρο), γεωεναλλάκτης (δεξιά)

3.2.4. Μικρή ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα

Το έργο REUNI περιλαμβάνει επίσης την εγκατάσταση μίας μικρής ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα, ελικοειδούς τύπου, ισχύος 1 KW, της εταιρείας V-AIR Technologies Inc, τύπου VISIOINAIR3, η οποία τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια σύστημα συσσωρευτών της εταιρείας MONBAT συνολικής χωρητικότητας 180 Ah (εικόνα 5). Το αυτόνομο αιολικό σύστημα λειτουργεί για την τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια συνολικά έξι (6) θέσεων φόρτισης ηλεκτρικών ποδηλάτων. Η μικρή ανεμογεννήτρια τοποθετήθηκε σε κατάλληλη θέση μεταξύ του ηλιακού πεδίου και του κτιρίου του ενεργειακού κέντρου της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ. Πλέον της μικρής Α/Γ και του μεταλλικού ιστού, το αυτόνομο σύστημα περιλαμβάνει την τοποθέτηση Midnite Clipper (MNCLIP1.5KAC) της Midnite Solar Inc και του ρυθμιστή φόρτισης Classic MPPT Charge Controller (Classic 250) της Midnite Solar Inc για την εξασφάλιση της εύρυθμης και ασφαλούς λειτουργίας του αιολικού σταθμού.



Εικόνα 5. Μικρής Α/Γ και σύστημα διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας

4. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ Α.Π.Ε.

Οι παρεμβάσεις ενσωμάτωσης τεχνολογιών ΑΠΕ του έργου REUNI ολοκληρώθηκαν τον Απρίλιο του 2017. Συνεπώς, κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας δεν υπάρχουν διαθέσιμες ολοκληρωμένες μετρήσεις πεδίου από την λειτουργία των νέων συστημάτων ΑΠΕ που τοποθετήθηκαν. Με στόχο την πιστοποίηση των στόχων του έργου "REUNI", πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις λειτουργίας με χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και δεδομένα εισόδου πραγματικές τιμές/ενδείξεις που συλλέχθηκαν χειροκίνητα με χρήση φορητών οργάνων από τον χώρο των δοκιμών. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων εισήχθησαν ως δεδομένα τα στοιχεία των συστημάτων Α.Π.Ε. που τελικώς εγκαταστάθηκαν στην «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ..

Για τον υπολογισμό της παραγωγής θερμικής ενέργειας από τον προτεινόμενο υβριδικό σταθμό βιομάζας/ηλιακών συλλεκτών γίνεται χρήση του λογισμικού προσομοίωσης T*SOL Expert 4.5 [3]. Στον Πίνακα 3 δίνονται οι κυριότερες τιμές των παραμέτρων και οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό T*SOL. Τονίζεται πως η ζήτηση θερμικής ενέργειας για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης προκύπτει από πραγματικές καταναλώσεις των κτιρίων της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ.

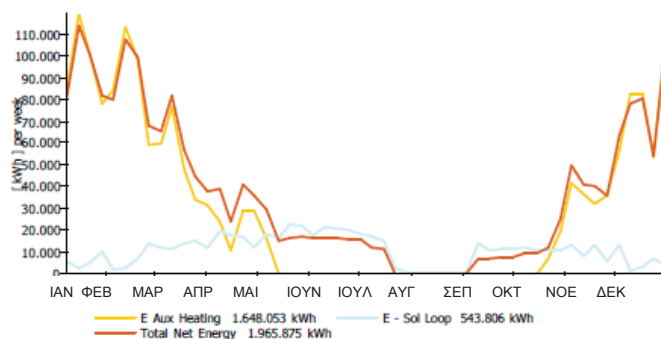
Πίνακας 3. Κυριότερες τιμές παραμέτρων και παραδοχές για την προσομοίωση λειτουργίας του υβριδικού σταθμού στο λογισμικό T*SOL

Ηλιακός Συλλέκτης	Επίπεδος επιλεκτικού τύπου ECOSYSTEM EPI 54 PA (740 τμχ) Καθαρής επιφάνειας 2,3 m ² , Μικτής επιφάνειας 2,58 m ²
	Βαθμός απόδοσης 77,1% (conversion factor)
	Συνολική ισχύς ηλιακών συλλεκτών 1.321,99 kW
Δοχείο αποθήκευσης	Δοχεία των 10 m ³ , συνολικά 40 m ³
Εναλλάκτης θερμότητας	Πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας (4 τμχ)
Ηλιακό δίκτυο σωληνώσεων	Ηλιακό υγρό μίγμα νερού/γλυκόλης με ποσοστό γλυκόλης 40%
	1.910 μέτρα σωληνώσεων DN25 έως DN100 (με μόνωση)
Λέβητας	Βιομάζας ισχύος 1,15 MW _{th} , μικτής καύσης, 85% β.α.
Ετήσια κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης	15.551,84 m ³ (27,38 m ³ /υπν./έτος βάσει TOTEE 20701-1/2010 [2])
Θερμοκρασία νερού δικτύου	7,3°C (Φεβρουάριος), 24,6°C (Αύγουστος) βάσει TOTEE 20701-1/2010 [2]
Προφίλ κατανάλωσης ζεστού νερού	«Φοιτητική εστία χωρίς καντίνα» από την βάση δεδομένων T*SOL με περίοδο λειτουργίας όλο το έτος εκτός από 15/7 έως 31/8.
Περίοδος θέρμανσης	Από 15/10 έως 30/4
Θερμικά φορτία κτιρίων	Σύμφωνα με τις μελέτες θερμικών απωλειών των κτιρίων Συνολικά 1.612,94 kW
Κλιματολογικά δεδομένα	1.601,5 kWh/m ² ετήσια συνολική ηλιακή ακτινοβολία 43,5% ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα έτος λειτουργίας του προτεινόμενου υβριδικού σταθμού στο λογισμικό T*SOL δίνονται στον Πίνακα 4 και στο σχήμα 2. Η κατανάλωση ανανεώσιμης θερμικής ενέργειας εκτιμάται σε 2.191,86 MWh/y. Τονίζεται πως στην παραπάνω κατανάλωση ανανεώσιμης θερμικής ενέργειας συνυπολογίζονται οι απώλειες οι οποίες προκύπτουν από την διανομή της θερμικής ενέργειας στα κτίρια, οι οποίες είναι ιδιαίτερα αυξημένες λόγω του συνολικού μήκους του δικτύου διανομής (205,37 MWh/y).

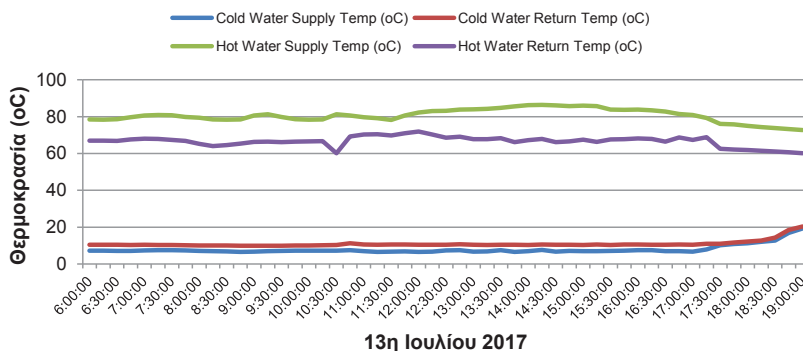
Πίνακας 4. Ενεργειακά αποτελέσματα προσομοίωσης υβριδικού σταθμού βιομάζας/ηλιακών συλλεκτών

Ηλιακή θερμική ενέργεια	543,81 MWh
Θερμική ενέργεια από το λέβητα βιομάζας	1.648,05 MWh
Ηλιακή κάλυψη των θερμικών φορτίων	24,9%



Σχήμα 1. Θερμική ενέργεια βοηθητικού συστήματος (λέβητας βιομάζας) και ηλιακού σταθμού (T*SOL προσομοίωση ενός έτους)

Η λειτουργία του κτιρίου του Αμφιθεάτρου, το οποίο αποτελεί το μοναδικό κτίριο που τροφοδοτείται με ψυχρό νερό από το Ενεργειακό Κέντρο, κατά την θερινή περίοδο περιορίζεται σε μερικές μόνο εκδηλώσεις και τελετές ορκωμοσίας κάθε έτος. Για την θερινή περίοδο του 2017, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, ο ψύκτης απορρόφησε για 114 ώρες παρέχοντας συνολικά 20.552 kWh ψυκτικής ενέργειας. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης ήταν 36.000 kWh, με μέσο βαθμό απόδοσης COP=0,57. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια καλύφθηκε πλήρως από την λειτουργία του θερμικού ηλιακού συστήματος. Ωστόσο, η παραπάνω λειτουργία του ψύκτη περιλαμβάνει αρκετές ώρες δοκιμαστικών ελέγχων. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγόμενης ψυκτικής ενέργειας λαμβάνεται υπόψη μία τυπική ημέρα λειτουργίας, η οποία πολλαπλασιάζεται επί τον εκτιμώμενο αριθμό ημερών λειτουργίας του αμφιθεάτρου την θερινή περίοδο. Στο σχήμα 3 δίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας προσαγωγής και επιστροφής του κρύου νερού από το υβριδικό σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας. Η κατανάλωση ψυκτικής ενέργειας σε μία τυπική ημέρα εκτιμάται σε περίπου 1.500 kWh και συνεπώς η ετήσια καταναλισκόμενη ψυκτική ενέργεια θα είναι περίπου 30.000 kWh/y λαμβάνοντας υπόψη 20 ημέρες λειτουργίας του αμφιθεάτρου. Με μέσο συντελεστή COP=0,6, η κατανάλωση θερμικής ενέργειας από το ηλιακό σύστημα της τάξης των 50.000 kWh/y. Συνεπώς, η ανανεώσιμη θερμική ενέργεια που καταναλώνεται για την θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ZNX για τα κτίρια της «Κοινότητας» εκτός του Εστιατορίου εκτιμάται σε 2.241,86 MWh/y.



Σχήμα 3. Μετρήσεις θερμοκρασίας τυπικής ημέρας λειτουργίας του συστήματος ψύξης του Αμφιθεάτρου

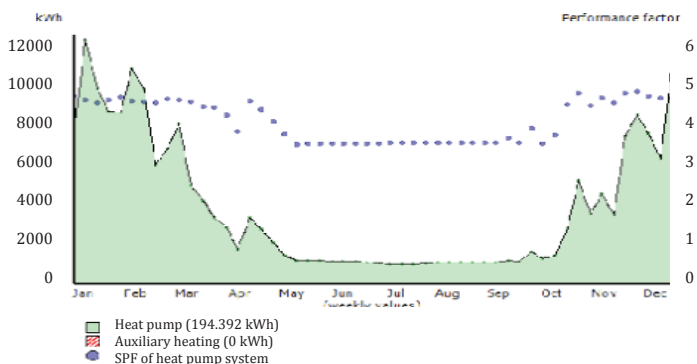
Το κτίριο του Εστιατορίου λειτουργεί όλο το χρόνο εκτός της περιόδου 15/7 έως 31/08 και των διακοπών των Χριστουγέννων και του Πάσχα. Το σύστημα της αβαθούς γεωθερμίας λειτουργεί πλήρως το καλοκαίρι του 2017 δίνοντας πραγματικά στοιχεία της παραγόμενης ψυκτικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, το σύστημα των γεωθερμικών αντλιών (ΓΑΘ) προσήγαγε συνολικά 523,4 m³ ρευστού σε περίπου 100 ώρες λειτουργίας, μέσα στις οποίες περιλαμβάνονται δοκιμές και έλεγχοι. Η μέση διαφορά ΔΤ ήταν περίπου 4°C (προσαγωγή 8°C, επιστροφή 12°C). Με βάση αυτά τα στοιχεία η ετήσια παραγόμενη ψυκτική ενέργεια από το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας εκτιμάται σε 27.300 kWh/y. Ο μέσος βαθμός απόδοσης των ΓΑΘ εκτιμάται σε EER=4,61, το οποίο συνεπάγεται την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ίση με περίπου 5.950 kWh/y, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια 21.350 kWh/y αποτελεί καταναλισκόμενη γεωθερμική ενέργεια.

Κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από την λειτουργία του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας για θέρμανση του κτιρίου του Εστιατορίου καθώς η κατασκευή του συστήματος ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2017. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας για την θέρμανση και το ZNX του κτιρίου του εστιατορίου, γίνεται χρήση του λογισμικού GeoT*SOL [2]. Τα δεδομένα και οι κυριότερες παραδοχές για την εκπόνηση της προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- Θέρμανση 35°C/27°C
- Θερμικές απώλειες 116,92 KW_{th} (σύμφωνα με μελέτη θερμικών απωλειών)
- Εσωτερική θερμοκρασία 20°C (TOTEE 20701-1 – πίνακας 2.2)
- Κατανάλωση ZNX 5.658,11 lt/ημέρα
- Θερμοκρασία ZNX 45°C
- Θερμική απολαβή 61,3 W/m
- Βάθος γεωτρήσεων 90 m
- Σύνολο γεωτρήσεων 34
- Διάμετρος γεώτρησης 150 mm

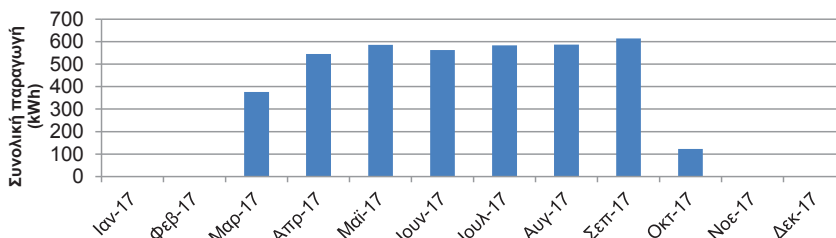
Η θερμική απολαβή λαμβάνεται από το test θερμικής απόκρισης που πραγματοποιήθηκε για τον εγκατεστημένο γεωαναλλάκτη του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας της «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ.. Το Σχήμα 4 δίνει την μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ZNX του κτιρίου του Εστιατορίου καθώς επίσης και τον εποχικό βαθμό απόδοσης (seasonal COP) λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, όπως προκύπτει από την προσομοίωση στο GeoT*Sol. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται σε 46.110 kWh/έτος, ενώ η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια για θέρμανση εκτιμάται σε 131.085 kWh/έτος και για ZNX 63.377 kWh/έτος. Από τα παραπάνω αφαιρείται η καταναλισκόμενη ενέργεια για την περίοδο 15/7 έως 31/8 κατά την οποία δεν λειτουργεί το κτίριο του εστιατορίου, καθώς επίσης και για τις περιόδους διακοπών Χριστουγέννων και Πάσχα. Αθροιστικά, η κατανάλωση ανανεώσιμης γεωθερμικής ενέργειας εκτιμάται σε 166.400 kWh/έτος, ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 47.500 kWh ενέργειας για την θέρμανση/ψύξη και ZNX του κτιρίου του εστιατορίου.



Σχήμα 4. Θερμική ενέργεια για θέρμανση και ZNX από σύστημα ΓΑΘ (GeoT*SOL)

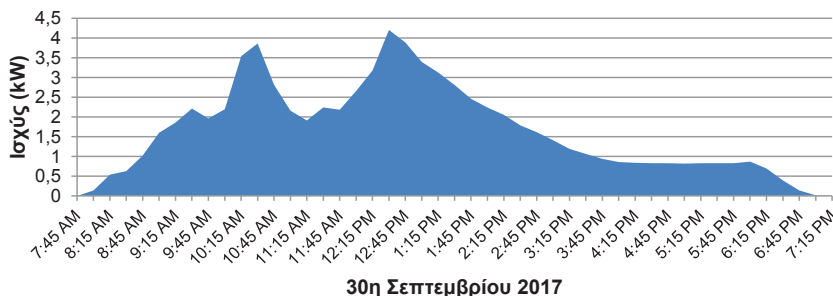
Στο σχήμα 5 δίνεται η μηνιαία παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του εγκατεστημένου αυτόνομου Φ/Β σταθμού από την ημερομηνία ενεργοποίησής του μέχρι και την ημερομηνία συγγραφής της παρούσας

εργασίας. Η μέχρι σήμερα (14 Μαρτίου έως 10 Οκτωβρίου 2017) συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ισούται με 3980 kWh.



Σχήμα 5. Μηνιαία παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον Αυτόνομο Φ/Β Σταθμό

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 6, ακόμα και μία συνεφιασμένη ημέρα όπως η 30^η Σεπτεμβρίου 2017, το Φ/Β σύστημα καταφέρνει με ευκολία να φορτίσει πλήρως τους συσσωρευτές ενέργειας πριν την ολοκλήρωση της ημέρας (3:45μμ). Συνεπώς, διαπιστώνεται πως είναι δυνατή η σύνδεση περισσότερων ηλεκτρικών φορτίων. Ωστόσο, το φ/β σύστημα βρίσκεται σε στάδιο δοκιμαστικού ελέγχου και βάσει των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων αναμένεται να γίνει επέκταση σε λοιπά ηλεκτρικά φορτία (πχ. δωμάτια). Πριν την επέκταση σε λοιπά ηλεκτρικά φορτία θα πρέπει να ελεγχθεί η συμπεριφορά του συστήματος κατά την χειμερινή περίοδο. Με βάση προσομοίωση της λειτουργίας του Φ/Β συστήματος με χρήση του λογισμικού SUNNY DESIGN 3 [4] στο οποίο εισήχθησαν τα πραγματικά δεδομένα της εγκατάστασης και λαμβάνοντας υπόψη ότι στόχος είναι η μέγιστη απορρόφηση της παραγόμενης ενέργειας του φ/β συστήματος, η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φ/β σύστημα εκτιμάται για ένα έτος σε 71.600 kWh.



30η Σεπτεμβρίου 2017

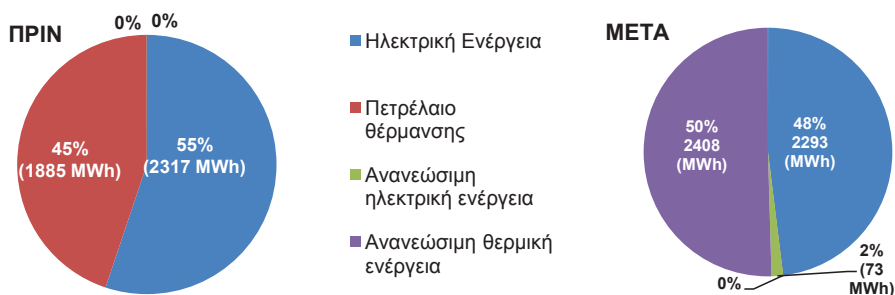
Σχήμα 6. Διακύμανσης ισχύος Φ/Β συστήματος την 30-09-2017

Κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας δεν έχει ολοκληρωθεί η προμήθεια ηλεκτρικών ποδηλάτων. Συνεπώς, η παραγόμενη ενέργεια από τον εγκατεστημένο αυτόνομο αιολικό σταθμό εκτιμάται μέσω ετήσιας προσομοίωσης. Βάσει υπολογισμών η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια η οποία αναμένεται να καταναλώνεται για την φόρτιση των ηλεκτρικών ποδηλάτων εκτιμάται σε 1.085 kWh.

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Μετά τις παρεμβάσεις ενσωμάτωσης τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ. στα πλαίσια της υλοποίησης της Πράξης REUNI η κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης μηδενίζεται, ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται ελάχιστα. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7, τα θερμικά φορτία του συνόλου της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ. καλύπτονται πλέον από συστήματα Α.Π.Ε., ενώ διαπιστώνεται η αύξηση της καταναλισκόμενης ετήσιας θερμικής ενέργειας με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης στα κτίρια των φοιτητικών εστιών στα Κιμμέρια Ξάνθης. Η πλήρης απεξάρτηση από την καύση πετρελαίου θέρμανσης για την θέρμανση και παροχή ΖΝΧ των κτιρίων της «Κοινότητας» του Δ.Π.Θ. συμβάλλει στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του κόστους λειτουργίας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης. Η συνολική

εκτιμώμενη κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας από την υλοποίηση του έργου REUNI εκτιμάται σε 2.481 MWh/y, το οποίο συνεπάγεται την αποφυγή περίπου 791 tn CO₂ ετησίως.



Σχήμα 7. Τελική ετήσια κατανάλωση ενέργειας PRIN και META τις παρεμβάσεις ενσωμάτωσης τεχνολογιών Α.Π.Ε. στην «Κοινότητα» του Δ.Π.Θ.

6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ-ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ REUNI

Το έργο REUNI υλοποιήθηκε επιτυχώς εντός ενός ιδιαίτερα περιορισμένου χρόνου υλοποίησης (Οκτώβριος 2015 έως Απρίλιος 2017) λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος των παρεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν. Η επιτυχής υλοποίηση του έργου είναι αποτέλεσμα έντονης και επίπονης εργασίας διοικητικών υπαλλήλων και εξωτερικών συνεργατών του Δ.Π.Θ. καθώς επίσης και αποτέλεσμα άριστης συνεργασίας του Δ.Π.Θ. τόσο με τους αναδόχους των υποέργων όσο και με τον Διαχειριστή του Προγράμματος ΧΜ ΕΟΧ 2009-2014 (Κ.Α.Π.Ε.). Επίσης ιδιαίτερες δυσκολίες οι οποίες αντιμετωπίστηκαν κατά την φάση κατασκευής αλλά κυρίως κατά τη φάση του δοκιμαστικού/λειτουργικού ελέγχου του έργου οφειλόταν κυρίως λόγω:

- Αστοχιών που παρατηρήθηκαν όπως διαρροών κατά την φάση των υδραυλικών δοκιμών και καθυστέρησης εντοπισμού τους λόγω του μεγάλου εύρους του ηλιακού θερμικού πεδίου με ένα δίκτυο σωληνώσεων (κύριων και βοηθητικών) άνω των 3 Km,
- Πολυμορφίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, βιομάζα, γεωθερμική, αιολική), και ταυτόχρονης ύπαρξης δόκιμων περιβαλλοντικών συνθηκών (ηλιοφάνεια, άνεμος κ.λ.π.).
- Προβλημάτων συμβατότητας λόγω του εύρους του απαιτούμενου εξοπλισμού για αυτοματισμό, έλεγχο, παρακολούθηση και καταγραφή των διαφόρων μεγεθών του έργου. Υπήρξε η ανάγκη ανάπτυξης αρκετές φορές συστημάτων προσαρμογής του νέου εξοπλισμού προκειμένου να συνεργαστεί με τον υφιστάμενο (πεπαλαιωμένο) του ενεργειακού κέντρου, προκαλώντας όμως αντίστοιχες χρονικές καθυστερήσεις σε άλλες δραστηριότητες του έργου π.χ. ολοκλήρωσης τοποθέτησης μετρητικού εξοπλισμού. Χαρακτηριστική περίπτωση η προσαρμογή των πεπαλαιωμένων ηλεκτρονόμων (ρελέ) των ηλεκτρικών πινάκων του κέντρου προκειμένου να συνεργαστούν με το σύστημα BMS της υβριδικής μονάδας ηλιακού/λέβητα βιομάζας. Σημειώνεται ότι τα προβλήματα αυτά δεν ήταν δυνατόν να εντοπιστούν κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) – ΦΕΚ Β (407)
- [2] Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 (β' έκδοση), ΤΟΤΕΕ 20701-2/2010 (α' έκδοση), ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 (β' έκδοση), ΤΟΤΕΕ 20701-4/2010 (β' έκδοση)
- [3] T*SOL Expert 4.5, In:<http://www.valentin.de>.
- [4] Sunny Design 3, In:<http://www.sma.de>

Εξοικονόμηση ενέργειας

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ

Δ. Γκορόγιας¹, Γ. Πανάρας^{1*}, Α. Αφεντουλίδης²

¹Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 50100, Κοζάνη

Τηλ.: +30 (24610) 56644; e-mail address: gpanaras@uowm.gr

²Hydronic P. Co.

Μαργαρίτη Δήμτσα 44, 50100, Κοζάνη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα αθλητικά κέντρα παρουσιάζουν σημαντικά ποσά ενεργειακής κατανάλωσης, σημειώνοντας ότι τα κλειστά κολυμβητήρια αποτελούν τις εγκαταστάσεις με την υψηλότερη κατανάλωση μεταξύ των αθλητικών κέντρων, συμπεριλαμβάνοντας και τα ανοιχτά κολυμβητήρια. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην απαίτηση για υψηλές τιμές εναλλαγών αέρα, σχετιζόμενες με την εξασφάλιση ικανοποιητικών συνθηκών υγιεινής, ενώ σημαντικό είναι και το θερμικό φορτίο της κολυμβητικής δεξαμενής. Στη σχετική βιβλιογραφία έχει διερευνηθεί το ζήτημα της ενεργειακής αποδοτικότητας κλειστών κολυμβητηρίων. Με δεδομένο ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί αφύγρανση, καθώς η κολυμβητική δεξαμενή δρα σαν πηγή λανθάνοντος φορτίου, στη βιβλιογραφία εμφανίζεται η λύση συστημάτων αντλιών θερμότητας, ενώ η χρήση ηλιακής ενέργειας, θερμικής αλλά και παρεχόμενης από Φ/Β συστήματα, μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κλειστού Δημοτικού Κολυμβητηρίου Κοζάνης με τη βοήθεια λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης. Το εσωκλίμα του κολυμβητηρίου χαρακτηρίζεται από την παρουσία υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας, όπως επιβεβαιώνεται από υφιστάμενη διερεύνηση, καθώς δεν υπάρχει σύστημα εξαερισμού και αφύγρανσης. Παράλληλα, το κέλυφος χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή θερμομονωτική συμπεριφορά, ενώ παρά την κάλυψη των ενεργειακών θερμικών αναγκών κατά τους χειμερινούς μήνες μέσω Τηλεθέρμανσης (Τ/Θ), η κατανάλωση πετρελαίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οπότε και η Τ/Θ δε λειτουργεί, είναι υψηλή και υπάρχει αναγκαιότητα μείωσης αυτής. Η διερεύνηση γίνεται με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, το οποίο επιτρέπει την ανάλυση των μεγεθών φορτίων και κατανάλωσης σε ετήσια βάση. Τα αποτελέσματα επιτρέπουν την αξιολόγηση του ενεργειακού, περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους από την εφαρμογή των υπό εξέταση λύσεων.

Λέξεις κλειδιά: ενεργειακή αναβάθμιση, προσομοίωση, EnergyPlus, κολυμβητήριο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αθλητικά κέντρα παρουσιάζουν σημαντικά ποσά ενεργειακής κατανάλωσης, σημειώνοντας ότι τα κλειστά κολυμβητήρια αποτελούν τις εγκαταστάσεις με την υψηλότερη κατανάλωση μεταξύ των αθλητικών κέντρων, συμπεριλαμβάνοντας και τα ανοιχτά κολυμβητήρια[1]. Η εξασφάλιση ικανοποιητικού ρυθμού αερισμού συστήνεται για λόγους υγιεινής [2], ούτως ώστε να απομακρυνθούν ρυπαρόνες ουσίες, ενδεχόμενα σχετιζόμενες με τα μέσα καθαρισμού της κολυμβητικής δεξαμενής. Επιπρόσθετα, με δεδομένο ότι η κολυμβητική δεξαμενή δρα ως σημαντική πηγή λανθάνοντος φορτίου, ο αερισμός μπορεί να οδηγήσει σε αποδεκτά όρια σχετικής υγρασίας. Στη σχετική βιβλιογραφία έχει διερευνηθεί το ζήτημα ενεργειακά αποδοτικών εγκαταστάσεων κολύμβησης κλειστού τύπου [1, 3]. Στο επίπεδο της απαίτησης για αφύγρανση, εντοπίζονται εργασίες οι οποίες διερευνούν το σχεδιασμό και εφαρμογή κατάλληλου συστήματος αντλίας θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, αφύγρανσης και ενδεχόμενα ψύξης[3-9].

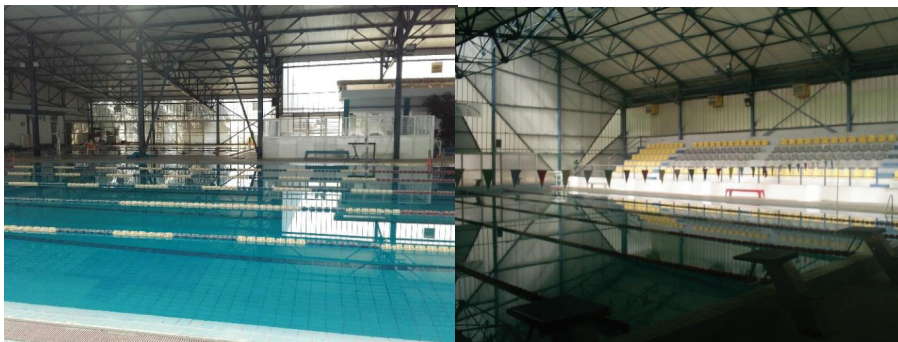
Οι παραπάνω εργασίες εστιάζουν σε ενεργειακά θέματα, και δεν υπεισέρχονται σε θέματα ανάλυσης της ποιότητας του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος. Οι Rajagoralan and Luther[10], αναλύουν και αξιολογούν τις θερμικές παραμέτρους εσωκλίματος αθλητικού κέντρου, σε πειραματικό και υπολογιστικό επίπεδο, προτείνοντας λύσεις φυσικού αλλά και εξαναγκασμένου αερισμού. Σημειώνεται ότι η εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας οδηγεί στην ανάγκη διερεύνησης πρακτικών φυσικού αερισμού για τους καλοκαιρινούς μήνες, ειδικά σε κολυμβητήρια της Ηπειρωτικής Ευρώπης [11].

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κλειστού Δημοτικού Κολυμβητηρίου Κοζάνης με τη βοήθεια λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο κολυμβητήριο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, τονίζοντας την ελλιπή ενεργειακή συμπεριφορά τόσο του κελύφους όσο και των μη αποδοτικών και επαρκών ενεργειακών συστημάτων. Τα ευρήματα και οι προτεινόμενες παρεμβάσεις δεν βασίζονται μόνο σε ενεργειακά κριτήρια, όπως η μείωση της συμβατικής κατανάλωσης καυσίμων, αλλά και στα συμπεράσματα από την αποτύπωση και αξιολόγηση των συνθηκών του εσωκλίματος. Η χρήση του λογισμικού προσομοίωσης EnergyPlus και η δυνατότητα ανάλυσης των μεγθών φορτίων και κατανάλωσης σε ετήσια βάση, επιτρέπει τη ρεαλιστική αποτίμηση των υπό εξέταση παρεμβάσεων και αξιολόγηση του ενεργειακού, περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους.

2. ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΤΙΡΙΟ: ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟ ΚΟΖΑΝΗΣ

2.1 Γενικά - Κέλυφος

Το Δημοτικό κολυμβητήριο της Κοζάνης βρίσκεται στα δυτικά της πόλης. Πρόκειται για ένα ανοιχτό κολυμβητήριο το οποίο μετατράπηκε σε κλειστό την δεκαετία του '90. Το Κολυμβητήριο αποτελείται από ένα (1) όροφο (εικόνα 1), και η έκτασή του, σύμφωνα με στοιχεία που παρέχει η Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου, είναι 1695.36 m², με επιφάνεια δώματος ή στέγης 1511.95 m². Την κατασκευή συμπληρώνει και μικρής, αναλογικά με τη συνολική, έκτασης υπόγειο, το οποίο καταλαμβάνει επιφάνεια 75.2 m², και χρησιμοποιείται ως λεβητοστάσιο.



Εικόνα 1 □ Γενική άποψη κολυμβητηρίου

Το κέλυφος του κτιρίου χαρακτηρίζεται από την χρήση και φυσικά την έκταση των μεταλλικών πάνελ. Την κατασκευή συμπληρώνουν κουφώματα αλουμινίου παλαιού τύπου. Ως μια γενική αποτίμηση, το κέλυφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως πεπαλαιωμένο, παρουσιάζοντας ελλιπή θερμομονωτική συμπεριφορά, τόσο λόγω της κακής κατάστασης της μόνωσης (αφρός πολυουρεθάνης) και της επιφάνειας των πάνελ όσο και των απωλειών λόγω της προβληματικής συναρμογής των υαλοπινάκων στα κουφώματα.

Το κολυμβητήριο λειτουργεί όλο το χρόνο, εξαιρουμένης της περιόδου από 15/7 – 15/9 για λόγους συντήρησης. Το ωράριο λειτουργίας είναι 9 π.μ. – 10.30 μ.μ.

2.2 Ενεργειακά συστήματα

Το Κολυμβητήριο παρουσιάζει ανάγκες θέρμανσης σε ετήσια βάση, λόγω των απαιτήσεων της πισίνας αλλά και του νερού χρήσης των αθλητών. Φυσικά, τους χειμερινούς μήνες είναι αναγκαία η θέρμανση και του εσωτερικού χώρου. Τα φορτία ψύξης, αν και σημαντικά κατά τη θερινή περίοδο, δεν εξυπηρετούνται, εξαιρώντας το χώρο της γραμματειακής υποστήριξης.

Για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση χρησιμοποιείται τηλεθέρμανση, η οποία όμως δεν είναι διαθέσιμη όλο το έτος, αλλά καλύπτει την περίοδο 15/10 – 15/5. Στο υπόλοιπο διάστημα χρησιμοποιείται συμβατικός καυστήρας πετρελαίου. Η θέρμανση των χώρων γίνεται με τη χρήση θερμαντικών σωμάτων, πεπαλαιωμένου τύπου, ενώ υπάρχει η δυνατότητα θέρμανσης με αέρα μέσω συστήματος τοπικών κρεμαστών ανεμιστήρων συνδεδεμένων με δίκτυο νερού, η οποία εν τούτοις δεν αξιοποιείται.

Στο Κολυμβητήριο δεν υπάρχουν εγκατεστημένα συστήματα ΑΠΕ ή εξοικονόμησης ενέργειας.

<i>Πίνακας 1: Συμβατικά ενεργειακά συστήματα κάλυψης θερμικών & ψυκτικών αναγκών</i>		
Σύστημα	Αριθμός μονάδων (-)	Ισχύς (KW)
Λέβητας (πετρελαίου)	1	581.5
Θερμικός υποσταθμός T/Θ	3	697.8 (=3x232.6)
Ψυκτικές μονάδες split units	1	3.52

Τα ηλεκτρικά φορτία συνίστανται σε φορτία φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών. Χρησιμοποιούνται λαμπτήρες φθορισμού κυρίως, καθώς και προβολείς αλογόνου. Οι ηλεκτρικές συσκευές διαχωρίζονται σε συσκευές γραμματειακής υποστήριξης (π.χ. PC, πολυμηχάνημα, κλπ.), συσκευές τύπου αερόθερμου στα αποδυτήρια και σημαντικής ισχύος κυκλοφορητές / αντλίες στο λεβητοστάσιο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αλλά και την κυκλοφορία – ανακύκλωση του νερού της κολυμβητικής δεξαμενής. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 50 kW.

2.3 Ποιότητα εσωκλίματος και ενεργειακή συμπεριφορά

Για τη διαπίστωση της ποιότητας του εσωκλίματος στο κολυμβητήριο, πραγματοποιήθηκε καμπάνια μέτρησης την περίοδο Ιουνίου-Ιουλίου 2017[12]. Στον πίνακα 2 συνοψίζονται οι τιμές των μετρήσεων για τη θερμοκρασία (T), σχετική υγρασία (RH), συγκέντρωση CO₂, ταχύτητα αέρα στον εσωτερικό χώρο, ενώ τοποθετήθηκε και μετεωρολογικός σταθμός σε παρακείμενη θέση του κολυμβητηρίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το εσωκλίμα του κολυμβητηρίου χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές θερμοκρασίας αλλά και σχετικής υγρασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο ζήτημα της υγρασίας, καθώς σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές CO₂ καταδεικνύει τον ελλιπή εξαερισμό του κολυμβητηρίου. Κάτι τέτοιο οφείλεται φυσικά στην απουσία συστήματος εξαερισμού, και στην προσπάθεια των ιθυνόντων να εξασφαλίσουν επαρκή φυσικό εξαερισμό μέσω της ελεγχόμενης χρήσης των διαθέσιμων ανοιγμάτων. Η πρακτική αυτή διαπιστώθηκε αφενός ότι δεν οδηγεί σε επαρκή επίπεδα αερισμού, σημειώνοντας τιμές 0.5-1 αλλαγών αέρα την ώρα (h⁻¹) [12] όταν οι αντίστοιχες απαιτήσεις αερισμού είναι 3-6 h⁻¹[1], ενώ παράλληλα κρίνεται ως μη επιθυμητή, καθώς συνοδεύεται από αύξηση του αισθητού φορτίου λόγω της εισαγωγής μεγάλων ποσοτήτων θερμού (το καλοκαίρι) και ψυχρού (το χειμώνα) αέρα.

Πίνακας 2: Μέσες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων και παραμέτρων θερμικής άνεσης στο κολυμβητήριο κατά τη διάρκεια της περιόδου μετρήσεων

Παράμετρος	Εσωτερικός χώρος			Εξωτερικός χώρος		
	Μέση τιμή	Min	Max	Μέση τιμή	Min	Max
T (°C)	26.4	19.2	37.5	24.4	14.5	35.9
RH (%)	67.4	23.9	95.7	44.4	23.4	77.1
CO ₂ (ppm)	501.6	258.9	1321.5	-	-	-
Ταχύτητα αέρα(m/s)	0.099	0.003	1.622	0.78	0.40	1.68
Βροχόπτωση(mm)	-	-	-	2.6	-	-

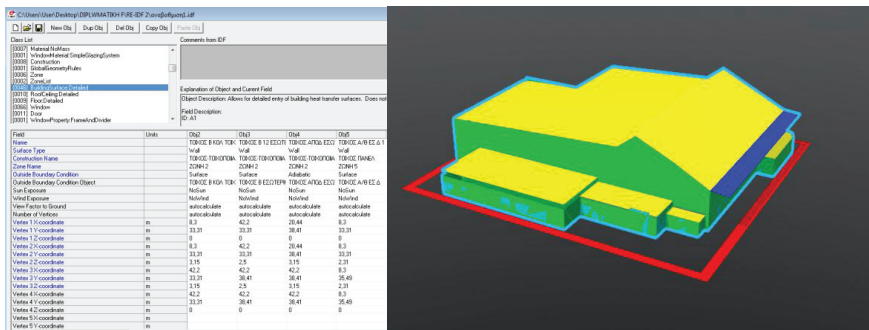
Παράλληλα, το κέλυφος χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή θερμομονωτική συμπεριφορά, ενώ παρά την κάλυψη των ενεργειακών θερμικών αναγκών κατά τους χειμερινούς μήνες μέσω Τηλεθέρμανσης (T/Θ), η κατανάλωση πετρελαίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οπότε και η T/Θ δε λειτουργεί, είναι υψηλή και υπάρχει αναγκαιότητα μείωσης αυτής. Ειδικότερα, σύμφωνα με στοιχεία της Τεχνικής Υπηρεσίας για τα έτη 2008-2014, αναφέρεται κατανάλωση ηλεκτρισμού της τάξης των 100 MWh, T/Θ 600 MWh και 7000 l πετρελαίου, χωρίς σημαντική αυξομείωση.

3. ΠΡΟΣΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

3.1 Παραδοχές μοντελοποίησης- Εισαγωγή δεδομένων

Το EnergyPlus είναι ένα πρόγραμμα δυναμικής προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς. Το EnergyPlus είναι δωρεάν, ανοικτού κώδικα και cross-platform - λειτουργεί με λειτουργικά συστήματα Windows, MacOSX και Linux. Η ανάπτυξη του χρηματοδοτείται από το Γραφείο Τεχνικών Τεχνολογιών (BTO: Building Technologies Office) του Υπουργείου Ενέργειας (DOE: Department Of Energy) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής [13].

Για την εισαγωγή της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το EnergyPlus (εικόνα 2). Ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στο παρόν πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε με την προσθήκη των συντεταγμένων των ακμών των γεωμετρικών στοιχείων, που συνιστά τη μοναδική μέθοδο χωρίς την χρήση άλλου λογισμικού. Τα κλιματολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση αναφέρονται στην Κοζάνη. Πραγματοποιήθηκε θεώρηση κτιρίου έξι θερμικών ζωνών: 5 θερμαινόμενων & μηχανοστασίου. Οι θερμαινόμενες ζώνες αναφέρονται στους χώρους της πισίνας, των αποδυτηρίων, των γραφείων (2 τμήματα) και των τουαλετών.



Εικόνα 2 □ Εισαγωγή γεωμετρίας κολυμβητηρίου στο λογισμικό EnergyPlus

Για τον προσδιορισμό των απαραίτητων τιμών των σχετικών παραμέτρων με τη θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους, αλλά και της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων, πραγματοποιήθηκε επιθεώρηση όπως προβλέπει η TOTEE 20701-1 [14]. Για την παροχή νωπού αέρα στο χώρο, επιλέχθηκε τιμή 10.000 m³/h τις ώρες λειτουργίας και 3600 m³/h τις υπόλοιπες ώρες λόγω διείσδυσης από κουφώματα και χαλαράδες, σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις [12].

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις του θερμοστάτη αυτή τέθηκε σε Θερμοκρασία θέρμανσης χώρου πισίνας: 24 °C (ζώνη 1), Θερμοκρασία θέρμανσης υπόλοιπων χώρων: 20 °C (ζώνες 2-5) και θερμοκρασία θέρμανσης νερού πισίνας: 26 °C, σύμφωνα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία [1] αλλά και την εμπειρία από την διερεύνηση των εσωκλιματικών συνθηκών στο κολυμβητήριο [12].

Τέλος όσον αφορά την παρουσία των ατόμων, προβλέφθηκε παρουσία 25-200 ατόμων (αθλητών ή συνοδών) ανάλογα με την ημέρα και ώρα σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία πραγματικής λειτουργίας. Η παρουσία εισάγεται στη βάση ωριαίων τιμών στο λογισμικό.

4. Σενάριο ενεργειακής αναβάθμισης-Ενεργειακές παρεμβάσεις

Με δεδομένες τις ιδιαιτερότητες και σημαντικές ελλείψεις της εν λόγω εγκατάστασης, προτιμήθηκε η διατύπωση ενός βασικού σεναρίου, το οποίο να θεραπεύει τις ελλείψεις αλλά και να είναι εφικτή η εφαρμογή του χωρίς απαίτηση παρεμβάσεων μεγάλης κλίμακας. Ειδικότερα οι παρεμβάσεις περιλαμβάνουν:

4.1 Αναβάθμιση κελύφους

-Αντικατάσταση υφιστάμενων πάνελ πολυουρεθάνης από νέα, καλύτερης αποδοτικότητας ($U=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$). Προτείνεται να διερευνηθεί η περίπτωση του πετροβάμβακα, ο οποίος παρουσιάζει αντοχή στην αλλοίωση των χαρακτηριστικών του λόγω της παραμονής σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας ή στην έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ παράλληλα δρα και ηχομονωτικά. Επιπρόσθετα η χρήση πετροβάμβακα αυξάνει την πυρανοτοχή του κελύφους.

-Αντικατάσταση υφιστάμενων διαφανών στοιχείων πολυκαρβονικών φύλλων από νέα, καλύτερης αποδοτικότητας ($U=2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$).

4.2 Φωτισμός

Αντικατάσταση των λαμπτήρων φθορίου και των προβολέων αλογόνου του κολυμβητηρίου με φωτισμό τύπου LED. Εγκατεστημένη ισχύς: 3.260 W(σημειώνοντας υφιστάμενη ισχύ: 15.546 W).

4.3 Λέβητας πετρελαίου

Αλλαγή του παλαιού και ενεργοβόρου λέβητα πετρελαίου με νέο λέβητα (βαθμός απόδοσης νέου λέβητα 97%, υπολογιζόμενη ισχύς 350kW). Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη ισχύς καλύπτει τις απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου μετά την βελτίωση της θερμομονωτικής συμπεριφοράς, σημειώνοντας την σημαντική επιβάρυνση σε θερμική ισχύ που θα προκύψει από την λειτουργία του συστήματος αερισμού.

4.4 Σύστημα αποθήκευσης-επανακυκλοφορίας του ΖΝΧ

Προσθήκη μόνωσης στο σύστημα αποθήκευσης-επανακυκλοφορίας του ΖΝΧ.

4.5 Κάλυμμα πισίνας

Τοποθέτηση καλύμματος στην κολυμβητική δεξαμενή τις ώρες που δεν λειτουργεί για την μείωση των επιπέδων υγρασίας στο χώρο και των ενεργειακών απωλειών του νερού προς το περιβάλλον.

4.6 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Εγκατάσταση πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του κολυμβητηρίου για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε ηλεκτρισμό. Σύμφωνα με την ανάλυση που ακολουθεί, η απαιτούμενη επιφάνεια των πλαισίων είναι 300 m² πλαισίων.

4.7 Θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες

Για την κάλυψη του φορτίου ζεστού νερού χρήσης θα τοποθετηθούν στην οροφή απλοί επίπεδοι συλλέκτες. Σύμφωνα με την ανάλυση που ακολουθεί, η απαιτούμενη επιφάνεια των συλλεκτών είναι 400 m². Σημειώνεται ότι για λόγους πολυπλοκότητας όσον αφορά την εισαγωγή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής του ηλιακού θερμικού συστήματος στην πλατφόρμα του EnergyPlus, προτιμήθηκε ο υπολογισμός της απαιτούμενης επιφάνειας σύμφωνα με τη μέθοδο f-chart [15].

4.8 Μηχανικό σύστημα αερισμού

Τοποθέτηση μηχανικού συστήματος αερισμού με μέγιστη παροχή εξωτερικού αέρα 27.000 m³/h, η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις υγιεινής σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [1, 16] για τον εν λόγω χώρο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η υιοθετούμενη τιμή αερισμού συμφωνεί με τα αναφερόμενα

κατώτατα όρια, ενώ ο KENAK [13] προτείνει ακόμη υψηλότερες τιμές. Σε κάθε περίπτωση, ο προσδιορισμός ικανοποιητικού, όχι όμως υπέρμετρα υψηλού ρυθμού εναλλαγής αέρα είναι σημαντικός, τόσο για τη ρύθμιση ικανοποιητικών συνθηκών υγιεινής καισχετικής υγρασίας αλλά και αποφυγής άσκοπων καταναλώσεων ενέργειας.

4.9 Σύστημα ψύξης (αντλία θερμότητας)

Εγκατάσταση κλιματιστικής μονάδας για την κάλυψη των φορτίων ψύξης με ονομαστική τιμή EER: 3

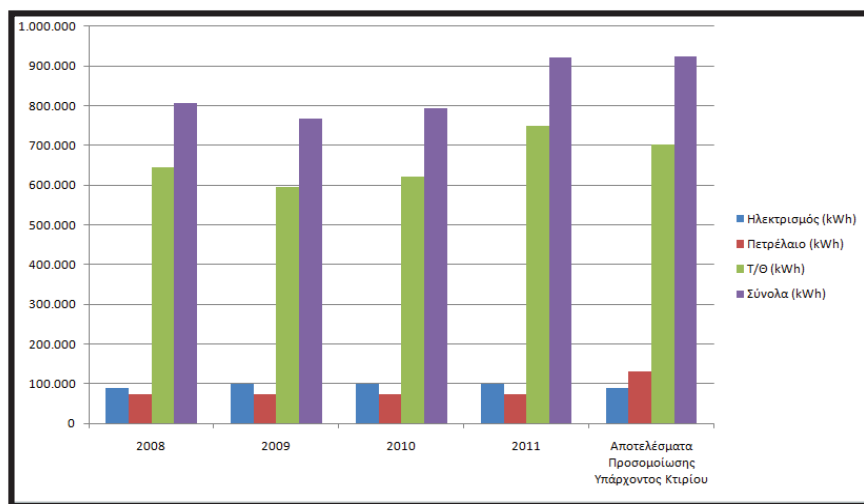
4.10 Σύστημα θέρμανσης

Αντικατάσταση των υπαρχόντων σωμάτων με σώματα υψηλής αποδοτικότητας.

5. Αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης. Ειδικότερα, στο διάγραμμα1 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις ανά πηγή προέλευσης της ενέργειας για τα έτη 2008-2011, σύμφωνα με τους λογαριασμούς ενεργειακής χρέωσης του κολυμβητηρίου και τα αποτελέσματα καταναλώσεων του υπάρχοντος κτιρίου σύμφωνα με την ενεργειακή προσομοίωση.

Διάγραμμα 1: Καταναλώσεις ανά πηγή προέλευσης της ενέργειας, σύμφωνα με τους λογαριασμούς ενεργειακής χρέωσης κολυμβητηρίου και σύμφωνα με την ενεργειακή προσομοίωση του υπάρχοντος κτιρίου



Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1, τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα. Ειδικότερα, σε επίπεδο συνολικής κατανάλωσης η απόκλιση φτάνει μέχρι 17%, χαρακτηρίζοντας εύλογες τις παρατηρούμενες διαφορές. Βασικοί παράμετροι, που επιφέρουν αυτές τις διαφορές, είναι οι εξής:

- Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σε ένα τυπικό έτος, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, και ενδεχομένως παρουσιάζουν διαφορές με τα δεδομένα των διαθέσιμων ετών λειτουργίας, εστιάζοντας κυρίως στο έτος αναφοράς 2011.
- Σημαντικός είναι ο ρόλος του αερισμού του χώρου, ο οποίος γίνεται με μη ελεγχόμενο τρόπο από τους εργαζόμενους στο κολυμβητήριο, ενώ και τα διαφανή στοιχεία παρουσιάζουν ελλιπή συναρμογή με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολος ο προσδιορισμός της παροχής εισερχόμενου αέρα. Σχετική διερεύνηση για τον προσδιορισμό του φυσικού αερισμού του κολυμβητηρίου είναι διαθέσιμη στην εργασία των Markogiannaki et al. [12].

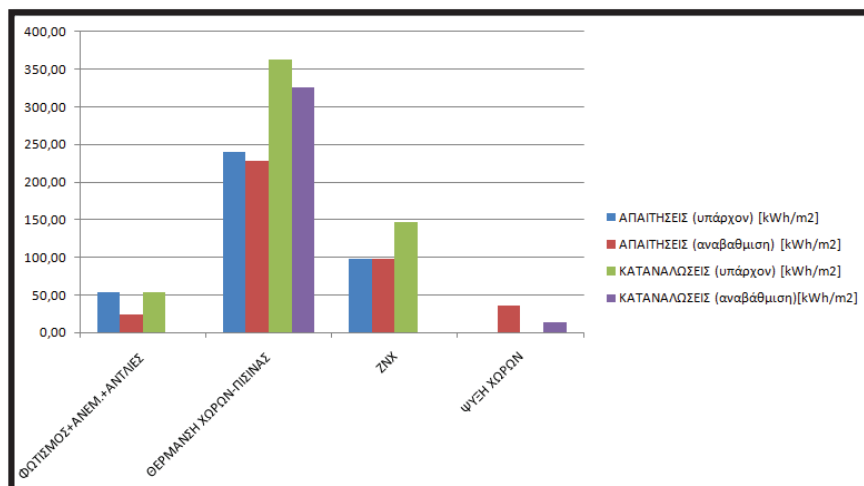
- Η θερμομονωτική συμπεριφορά του κελύφους αλλά και οι πραγματικές αποδόσεις των συστημάτων παρουσιάζουν ενδεχόμενες διαφορές σε σχέση με τις αποδιδόμενες τιμές από την επιθεώρηση.
- Παράμετροι όπως τα ωράρια λειτουργίας, η συνάθροιση κοινού, αλλά και οι τιμές των θερμοστατών χώρου και πισίνας παρουσιάζουν στην πραγματικότητα και κατά τη διάρκεια του έτους διαφοροποιημένες τιμές από τις υιοθετούμενες στην ανάλυση.

Σε κάθε περίπτωση, μπορεί να διατυπωθεί ότι τα υπολογιζόμενα και πραγματικά δεδομένα παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία, επιτρέποντας την αξιοποίηση του μοντέλου για τη διερεύνηση αποτελεσματικότητας σεναρίου ενεργειακής αναβάθμισης.

Εφαρμόζοντας το σενάριο της ενεργειακής αναβάθμισης και εξετάζοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις και καταναλώσεις του κολυμβητηρίου πριν και μετά την ενεργειακή αναβάθμιση ανά τελική χρήση(διάγραμμα 2), διαπιστώνεται ότι εκτός του φορτίου του ζεστού νερού χρήσης που παραμένει σταθερό και του φωτισμού (συν των υπολοίπων ηλεκτρικών συσκευών) που μειώνεται όπως ήταν αναμενόμενο λαμβάνει χώρα πολύ μικρή μείωση του φορτίου θέρμανσης χώρων και πισίνας. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του συστήματος μηχανικού αερισμού και παροχής νωπού αέρα, το οποίο όμως κρίνεται απαραίτητο για την επίτευξη κατάλληλων συνθηκών εντός του κτιρίου. Αντίστοιχα, το σύνολο των απαιτήσεων μειώνεται κατά 1.3% μόνο, γεγονός που οφείλεται στον προαναφερθέντα λόγο, καθώς και στην κάλυψη του φορτίου ψύξης.

Σχετικά με τις καταναλώσεις, αυτές είναι μηδενικές στις κατηγορίες ΖΝΧ και φωτισμός, καθώς αυτός ήταν ο στόχος κάλυψης φορτίων των συστημάτων ΑΠΕ. Για το φορτίο ψύξης του υπάρχοντος κτιρίου δεν παρουσιάζονται στοιχεία καθώς δεν διαθέτει κάποιο σύστημα ψύξης, όπως σημειώθηκε και στη σχετική ενότητα. Για το φορτίο ψύξης του σεναρίου αναβάθμισης, η κατανάλωση είναι μικρότερη της απαίτησης ως αποτέλεσμα της χρήσης αντλίας θερμότητας.

Διάγραμμα 2: Ενεργειακές απαιτήσεις και καταναλώσεις του κολυμβητηρίου ανά τελική χρήση, πριν και μετά την ενεργειακή αναβάθμιση



Στο διάγραμμα 3, που ακολουθεί, παρατίθενται οι απαιτήσεις, καταναλώσεις και η πρωτογενής ενέργεια, ανά μορφή καυσίμου, πριν και μετά την αναβάθμιση του κτιρίου. Το νέο στοιχείο σε αυτό το διάγραμμα είναι η απεικόνιση της πρωτογενούς ενέργειας καθώς και το ότι οι απαιτήσεις αναφέρονται στα φορτία που θα καλυφθούν από συμβατικές πηγές ενέργειας, τονίζοντας την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας/διείσδυσης ΑΠΕ.

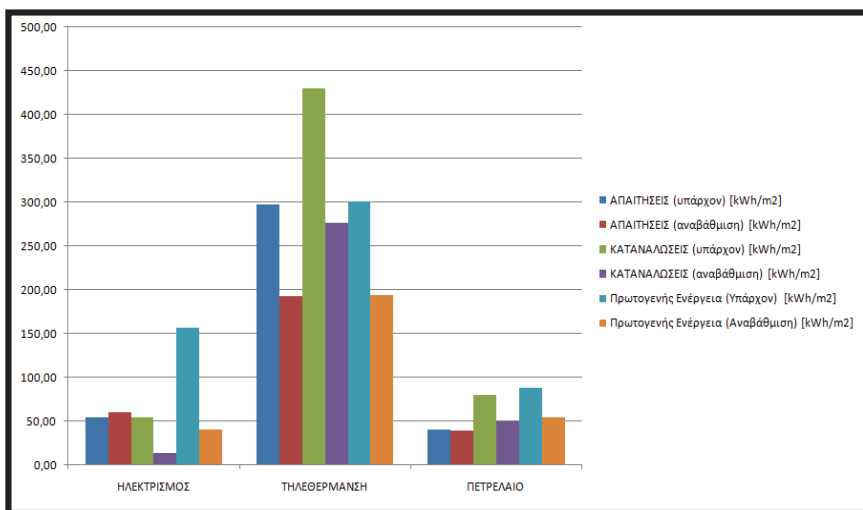
Πιο συγκεκριμένα, είναι φανερή μια αισθητή μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρισμού στο σενάριο της ενεργειακής αναβάθμισης. Η μείωση οφείλεται στην ευεργετική επίδραση των παρεμβάσεων, όπως η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων και λαμπτήρων τύπου LED, παρά την πρόσθεση στο σενάριο αναβάθμισης συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, όπως η αντλία θερμότητας και το μηχανικό σύστημα αερισμού.

Η μείωση των απαιτήσεων και των καταναλώσεων τηλεθέρμανσης, που είναι αρκετά μεγάλη –παρότι αυξήθηκε ο αερισμός-, οφείλεται στην βελτίωση του κελύφους, στην τοποθέτηση του καλύμματος στην κολυμβητική δεξαμενή και στην κάλυψη του φορτίου ΖΝΧ από ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες.

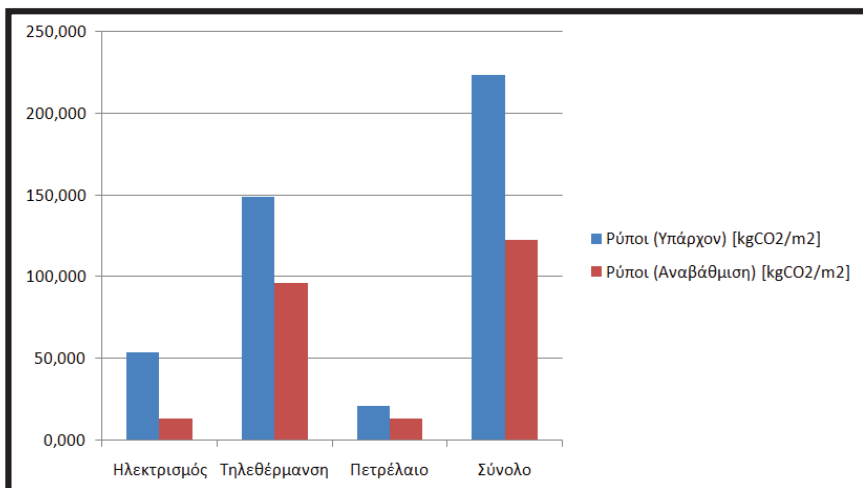
Αντίστοιχη συμπεριφορά των μεγεθών κατανάλωσης ενέργειας από τηλεθέρμανση παρατηρείται και στην περίπτωση του πετρελαίου, για τους ίδιους λόγους καθώς εξυπηρετούν σε μεγάλο βαθμό τις ίδιες ανάγκες.

Όπως παριστάνεται γραφικά στο Διάγραμμα 4, το οικολογικό αποτύπωμα του κολυμβητηρίου μειώνεται σημαντικά, με την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας να ελαττώνεται κατά 47,32% και τις εκπομπές ρύπων κατά 45,26%.

Διάγραμμα 3: Ενεργειακές απαιτήσεις, ενεργειακή κατανάλωση και πρωτογενής ενέργεια του κολυμβητηρίου πριν και μετά την ενεργειακή αναβάθμιση ανά καύσιμο



Διάγραμμα 4: Εκλυόμενοι ρύποι CO₂ ανά τετραγωνικό επιφανείας του κτιρίου.



Όσον αφορά την οικονομική ανάλυση, στους πίνακες 3, 4 παρατίθενται τα σχετικά κόστη λειτουργίας, για το υπάρχον κτίριο αλλά και σύμφωνα με το σενάριο ενεργειακής αναβάθμισης αντίστοιχα. Τα στοιχεία έχουν προκύψει σύμφωνα με τρέχοντες τιμές για τα ενεργειακά μεγέθη, μετά από επικοινωνία με την τεχνική υπηρεσία του Δήμου. Παρατηρείται μείωση της τάξης του 44,5 %. Αν συνυπολογιστεί το κόστος εγκατάστασης των παρεμβάσεων, σύμφωνα με πραγματικές τιμές της αγοράς για τα σχετικά συστήματα, προκύπτει χρόνος απόσβεσης 17έτη. Η εκτίμηση αυτή είναι ενδεικτική, και δεν αντιστοιχεί στην ακριβή οικονομική αποτίμηση του σχεδίου δράσης, η οποία θα απαιτήσει πιο σύνθετα εργαλεία οικονομικής ανάλυσης και ενδεχόμενα περισσότερο ακριβείς εκτιμήσεις για κάποιες παρεμβάσεις.

Πίνακας 3: Κόστος λειτουργίας υπάρχοντος κτιρίου

Πηγή Ενέργειας	Κόστος λειτουργίας [€/m ²]	Κόστος λειτουργίας [€]
Ηλεκτρισμός	10.4	10773.18
Τηλεθέρμανση	18.03	29924.08
Πετρέλαιο	3.96	6580.00
Σύνολα	32.39	47277.26

Πίνακας 4: Κόστος λειτουργίας κτιρίου σύμφωνα με το σενάριο ενεργειακής αναβάθμισης

Πηγή Ενέργειας	Κόστος λειτουργίας [€/m ²]	Κόστος λειτουργίας [€]
Ηλεκτρισμός	1.77	2931.07
Τηλεθέρμανση	11.79	19576.65
Πετρέλαιο	2.42	4018.30
Σύνολα	15.98	26526.02

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε, στη βάση λογισμικού προσομοίωσης και ειδικότερα του EnergyPlus, η ενεργειακή συμπεριφορά του Δημοτικού Κολυμβητηρίου Κοζάνης. Η αξιοποίηση λογισμικού προσομοίωσης για την αντιμετώπιση ενός εξειδικευμένου προβλήματος ενεργειακής αναβάθμισης, όπως αυτό ενός αθλητικού χώρου, με την ιδιαιτερότητα που εισάγει σε επίπεδο φορτίων η παρουσία της κολυμβητικής δεξαμενής, έδωσε τη δυνατότητα αξιόπιστης και ρεαλιστικής διαμόρφωσης και αποτίμησης των σεναρίων παρέμβασης.

Ειδικότερα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, είναι δυνατή σε ρεαλιστικό χρόνο απόσβεσης η υλοποίηση παρεμβάσεων βελτίωσης της ποιότητας του θερμικού περιβάλλοντος αλλά και σημαντικής μείωσης της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων σε ποσοστό 40% των ενεργειακών καταναλώσεων, η οποία προβλέπεται μείωση όλων των συμβατικών πηγών ενέργειας, αλλά κυρίως του ηλεκτρισμού.

Η εμπειρία από την παρούσα ανάλυση καταδεικνύει ότι η προσομοίωση, αν και απαιτητική σε υπολογιστικά εργαλεία και εξειδίκευση, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο συμπλήρωμα τόσο πειραματικών μεθόδων όσο και πρακτικών ενεργειακής επιθεώρησης (όπως ο ΚΕΝΑΚ) στα πλαίσια μιας μεθοδολογίας ολοκληρωμένης παρέμβασης ενεργειακής αναβάθμισης κτιριακών συγκροτημάτων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Trianti-Stourna, Spyropoulou, Theofylaktos, Droutsas, Balaras, Santamouris, Asimakopoulos, Lazaropoulou, Papanikolaou, Energy conversation strategies for sports centers : Part B – Swimming Pools, 1997.
- [2] ANSI/ASHRAE, 2016. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, United States.
- [3] Kampel W., Carlucci S., Aas B., Bruland A., 2016. Proposal of energy performance indicators for a reliable benchmark of swimming facilities. *Energy and Buildings* 129, 186-198
- [4] Kuyumcu M.E., Tutumlu H., Yumrutas R., 2016. Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank. *Energy Conversion and Management* 121, 349–357
- [5] Chow T.T., Bai Y., Fong K.F., Lin Z., 2012. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating. *Applied Energy* 100, 309-317
- [6] Sun P., Wu J.Y., Wang R.Z., Xu Y.X., 2011, Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools. *Energy and Buildings* 43, 1071-1080
- [7] Lee W.-S., Kung C.-K., 2008. Optimization of heat pump system in indoor swimming pool using particle swarm algorithm. *Applied Thermal Engineering* 28, 1647–1653
- [8] Johansson L., Westerlund L., 2001. Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat-recovery systems. *Applied Energy* 70, 281–303
- [9] Lazzarin R.M., Longo G.A., 1996. Comparison of heat recovery systems in public indoor swimming facilities. *Applied Thermal Engineering* 16(7), 561-570
- [10] Rajagopalan P., Luther M.B., 2013. Thermal and ventilation performance of a naturally ventilated sports hall within an aquatic centre. *Energy and Buildings* 58, 111–122
- [11] Tsoka S., 2015. Optimizing indoor climate conditions in a sports building located in Continental Europe. *Energy Procedia* 78, 2802 – 2807.
- [12] Markogiannaki M., Panaras G., Tolis E.I., Sakellaris Y., Bartzis J.G., 2017. Experimental and theoretical investigation of the ventilation level and internal comfort conditions of an indoor aquatic center. 19th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region. Rome, Italy.
- [13] Ιστοσελίδα: <https://energyplus.net/>
- [14] TEE, 2010. Τεχνική Οδηγία TOTEE 20701-1. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για το υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.
- [15] Duffie John A., Beckman William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition .Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [16] ASHRAE, 2011. *Fundamentals Handbook*. Atlanta, United States.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΗΣ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ.

Ραφαήλ Βαλκάνος, Κωνσταντίνος Πανάγος, Γιώργος Πανάρας*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,
Τηλ: 24610-56644, ΤΚ 50100, Κοζάνη
email: gpanaras@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Δημόσια Κτίρια αποτελούν σημαντικό παράγοντα ενεργειακής κατανάλωσης, με σημαντικά περιθώρια βελτίωσης, όπως υποδεικνύεται και από την ειδική μέριμνα που λαμβάνεται για την κατηγορία αυτή των κτιρίων στην επικαιροποιημένη Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα, Εξοικονόμηση Ενέργειας αλλά και διείσδυση των ΑΠΕ. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά ενός τέτοιου κτιρίου, και ειδικότερα της Παιδαγωγικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στη Φλώρινα. Πρόκειται για κτιριακό συγκρότημα με υψηλό κόστος κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, οφειλόμενο στην ανεπαρκή θερμομονωτική συμπεριφορά του κελύφους αλλά και στην απουσία συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Στην εργασία γίνεται διερεύνηση λύσεων ενεργειακής αναβάθμισης, εστιάζοντας στην θερμομονωτική ενίσχυση του κελύφους, στην αντικατάσταση των υφιστάμενων λαμπτήρων με αντίστοιχους τεχνολογίας LED, στην εγκατάσταση αντλιών θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης & ζεστού νερού χρήσης και Φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη των φορτίων ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της μεγάλης έκτασης του κτιρίου (10500 m² επιφάνεια δομημένου χώρου), προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν εύχρηστα μεθοδολογικά εργαλεία, όπως η μέθοδος των βαθμομερών για τον υπολογισμό των φορτίων, ενώ για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας από τα συστήματα ΑΠΕ χρησιμοποιούνται σχετικά απλοποιημένα ενεργειακά μοντέλα.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη δυνατότητα μετατροπής ενός ενεργοβόρου κτιρίου σε «πράσινο» κτίριο, μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, με τις επεμβάσεις να παρουσιάζουν ρεαλιστικό χρόνο απόσβεσης.

Λέξεις κλειδιά: Ενεργειακή αναβάθμιση, Δημόσιο Κτίριο, ΑΠΕ, Γεωθερμική ενέργεια, Γεωεναλλάκτης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ΕΕ δείχνει ιδιαίτερη μέριμνα στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων, με σημαντικότερη νομοθετική πρωτοβουλία την Οδηγία για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα Κτιρίων (2002/91/ΕΕ) [1], και την επικαιροποίηση αυτής (2010/31/ΕΕ) [2]. Παράλληλα, έχουν τεθεί και άλλες οδηγίες που υποστηρίζουν την βελτίωση της Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κτιρίων, σημειώνοντας την οδηγία 2012/27/ΕΕ [3] για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα, αλλά και για τη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), (οδηγία 2009/28/ΕΚ) [4]. Στο πλαίσιο των παραπάνω κειμένων έχουν τεθεί οι γνωστοί στόχοι 20% για τη διείσδυση των ΑΠΕ όσον αφορά την ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, καθώς και αυτήν για θέρμανση και ψύξη, 10% για τις μεταφορές αλλά και 20% για την εξοικονόμηση ενέργειας με ορίζοντα το έτος 2020. Οι εν λόγω στόχοι έχουν επικαιροποιηθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με αναφορά το έτος 2030, σε 27% για τις ΑΠΕ και 30% για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η επικαιροποίηση των στόχων έχει συνοδευτεί με την απαίτηση για ενεργειακά αποδοτικά κτίρια στον Δημόσιο Τομέα, όπως υποδεικνύει και ο Νόμος 3851/2010, που ενσωματώνει σε εθνικό επίπεδο τις απαιτήσεις για τις ΑΠΕ (οδηγία 2009/28/ΕΚ). Ειδικότερα όλα τα δημόσια κτίρια μέχρι το 2015 (και όλα τα νέα κτίρια μέχρι το 2020) θα πρέπει να καλύπτουν την ενεργειακή τους κατανάλωση από ΑΠΕ, συμπεριλαμβανοντας συστήματα τηλεθέρμανσης, συμπαρομαγής καθώς και αντλίες θερμότητας (Α/Θ) υψηλής αποδοτικότητας. Η οδηγία για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα αποδίδει τη μέριμνα για τα Δημόσια κτίρια στον αριθμό τους αλλά και λόγω της συμβολής τους στη Δημόσια ζωή, ζητώντας από τα κράτη μέλη συγκεκριμένα σχέδια Δράσης μέχρι το τέλος του 2013. Τέλος, αναφορά πρέπει να γίνει και στην έννοια του Κτιρίου Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (Near Zero Energy Building, nZEB) στον επικαιροποιημένο ΚΕΝΑΚ (2010/31/ΕΕ). Πρόκειται για κτίριο όπου η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πρέπει να καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγει επιτόπου ή πληθύν του κτιρίου. Σε κάθε περίπτωση, σε Ελληνικό επίπεδο, οι παραπάνω απαιτήσεις δεν έχουν εφαρμοστεί, καταδεικνύοντας καθυστέρηση τόσο σε επίπεδο εναρμόνισης με την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία, αλλά και εφαρμογής αυτής.

Τα κτίρια των Ελληνικών Πανεπιστημίων αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία Δημοσίων Κτιρίων. Παράλληλα με τις προαναφερθείσες απαιτήσεις, η ενεργειακή αποδοτικότητα των εν λόγω κτιρίων, και η αύξηση αυτής, θα πρέπει να ιδωθεί και υπό το πρίσμα της αιφορίας ανάπτυξης, όπως αυτή πρωτοεισήχθηκε μέσω της έκθεσης Brundtland [5]. Τα Πανεπιστήμια μέσω της αποστολής τους οφείλουν να προωθούν την έννοια της αιφορίας, τόσο μέσω των προγραμμάτων σπουδών τους [6,7], αλλά και στο επίπεδο της επιστημονικής έρευνας στα πεδία της αιφορίας και εξαγωγής της γνώσης αυτή στην κοινωνία [8]. Στο επίπεδο των Ελληνικών Πανεπιστημίων, λαμβάνουν χώρα σχετικές δράσεις, εκτεινόμενες και στους τρεις πυλώνες της αιφορίας (περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό). Αναφέρεται ειδικά σχετική εργασία για τη βιωσιμότητα του campus της Παιδαγωγικής Σχολής Φλώρινας, η οποία εστίασε και σε θέματα ενεργειακής κατανάλωσης των κτιριακών εγκαταστάσεων [9].

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η ενεργειακή αναβάθμιση των εν λόγω εγκαταστάσεων. Λόγω της μεγάλης έκτασης του κτιρίου (10300 m² επιφάνεια δομημένου χώρου), προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν σχετικά εύχρηστα μεθοδολογικά εργαλεία, όπως η μέθοδος των βαθμομερών για τον υπολογισμό των φορτίων, ενώ για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας από τα συστήματα ΑΠΕ χρησιμοποιούνται απλά ενεργειακά μοντέλα.

Για τον περιορισμό της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων διερευνήθηκε η λύση της αβαθούς γεωθερμίας, σημειώνοντας ότι στον Ελλαδικό χώρο, παρόλο που η χρήση τους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, υπάρχουν ήδη εφαρμογές σε μεγάλα κτίρια, όπως στο Δημαρχείο Πυλαίας με 21 κάθετες γεωτρήσεις των 80 m, στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Δημοσίου Δικαίου στα Λεγρένα και στα γραφεία ΚΑΠΕ στο Πικέρι με υδρογεώτρηση, καθώς και στο κτίριο Μεταλλειολόγων στην Πολυτεχνειούπολη του ΕΜΠ με συνδυασμό υδρογεώτρησης βάθους 280 m και 13 κάθετων γεωτρήσεων βάθους 90 m [10]. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης έκτασης και βάθους γεώτρησης, καθώς και μήκους του γεωεναλλάκτη για την ενεργειακή τροφοδοσία της Α/Θ αβαθούς γεωθερμίας, χρησιμοποιήθηκε σχετική μεθοδολογία της ASHRAE [11,12].

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη δυνατότητα μετατροπής ενός ενεργοβόρου κτιρίου σε «πράσινο» κτίριο, μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, με τις επεμβάσεις να παρουσιάζουν ρεαλιστικό χρόνο απόσβεσης.

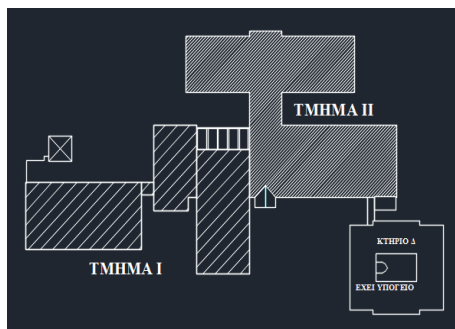
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου περιλαμβάνει την ανάλυση των ενεργειακών φορτίων, σύγκριση των θεωρητικά υπολογιζόμενων τιμών με διαθέσιμα στοιχεία ενεργειακών καταναλώσεων, και τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας συγκεκριμένων παρεμβάσεων. Οι παρεμβάσεις αναφέρονται στη βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας του κελύφους, την εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών αβαθούς γεωθερμίας, συμπεριλαμβανομένων χρήσεων ζεστού νερού χρήσης (για το εστιατόριο) αλλά και τη χρήση φωτισμού LED και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ.

2.2 Το κτίριο προς μελέτη

Το κτίριο που επιλέχθηκε, στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι η Παιδαγωγική σχολή, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, με έδρα τη Φλώρινα. Πρόκειται για εγκαταστάσεις συνολικής έκτασης 10.297,63 m² εκ των οποίων τα 9.360,99 m² είναι θερμαινόμενοι χώροι. Η Παιδαγωγική Σχολή χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το τμήμα I το οποίο ήταν και το πρώτο χρονολογικά κτίριο που χτίστηκε, το τμήμα II το οποίο αποτελεί την μετέπειτα επέκταση της παιδαγωγικής σχολής και το κτίριο Δ, το νεότερο χρονολογικά κτίριο, που στεγάζει τα γραφεία του προσωπικού, των καθηγητών, των διοικούντων και την γραμματεία του τμήματος.



Εικόνα 1 : Κάτοψη Κτιρίων

2.3 Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας

Ο βαθμός θερμομόνωσης ενός αδιαφανούς δομικού στοιχείου η στρώσεων προσδιορίζεται από τον συντελεστή θερμοπερατότητας (U) και υπολογίζεται από τον τύπο :

$$U = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_d + R_a} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (1)$$

- $U \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$, ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου,
- n [-], το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου,
- d [m], το πάχος της στρώσης,
- $\lambda \left[\frac{W}{m * K} \right]$, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της στρώσης,
- $R_i \left[\frac{m^2 * K}{W} \right]$, η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο,
- $R_a \left[\frac{m^2 * K}{W} \right]$, η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον,
- $R_\delta \left[\frac{m^2 * K}{W} \right]$, η θερμική αντίσταση στρώματος αέρα σε τυχόν υφιστάμενο διάκενο ανάμεσα στις στρώσεις του δομικού στοιχείου, με την προϋπόθεση ότι ο αέρας του διακένου δεν επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον και θεωρείται πρακτικά ακίνητος.

Τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν $U = 0.69-2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, ανάλογα με τον τύπο που εντοπίζεται στην κατασκευή του κτιρίου.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των διαφανών δομικών στοιχείων, για συνθετικό πλαίσιο με συντελεστή πλαισίου 30% και δίδυμο υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 6 mm, προκύπτει από την ΤΟΤΕΕ 20701-2/2010U = 3,3 $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$ [13].

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δαπέδου, με βάση την ΤΟΤΕΕ 20701-2/2010 [13], προκύπτει $U = 0,7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$, ενώ για οριζόντια οροφή κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη $U = 1,0 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$.

Τα αποτελέσματα του ολικού συντελεστή θερμοπερατότητας εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1 : Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας ($U_m \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$) των τμημάτων του υφιστάμενου κτιρίου			
	Ισόγειο	1 ^{ος} όροφος	2 ^{ος} όροφος
Τμήμα Ι	1,34	1,28	-
Τμήμα ΙΙ	1,48	1,31	-
Κτίριο Δ	1,26	1,26	1,12

Στον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας δεν συμπεριλήφθηκαν οι θερμογέφυρες, σταθμίζοντας τις αβεβαιότητες εισαγωγής τους αλλά και τις σχετικές αβεβαιότητες με την εφαρμογή της μεθόδου βαθμομερών, ειδικά για ένα τόσο μεγάλο κτίριο.

2.4 Υπολογισμός θερμικών φορτίων και κατανάλωσης πετρελαίου

Για τον υπολογισμό των θερμικών φορτίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των βαθμομερών θέρμανσης. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία εικοσιτετραώρου για τους χειμερινούς μήνες σε μια περιοχή, και μια θερμοκρασία αναφοράς η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με 18°C. Τα στοιχεία για τις βαθμομέρες θέρμανσης αντλήθηκαν από την εργασία των Παπακώστα κα. [15], με την κατάλληλη προσαρμογή για την περίπτωση του δαπέδου σύμφωνα και με τα στοιχεία για τη θερμοκρασία εδάφους από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 [14]. Οι βαθμομέρες παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 : Βαθμομέρες θέρμανσης για τη Φλώρινα		
	DD (K)	DD (K) δαπέδου (κτιρίου Δ)
Ιανουάριος	297,5	34
Φεβρουάριος	306	40
Μάρτιος	259,9	46
Απρίλιος	54	20
Μάιος	26,4	44
Ιούνιος	0	0
Ιούλιος	0	0
Αύγουστος	0	0
Σεπτέμβριος	0	0
Οκτώβριος	113,4	42
Νοέμβριος	242	44
Δεκέμβριος	268,6	34

Όσον αφορά τις θερμικές ανάγκες του κτιρίου (πίνακας 3), για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο τύπος

$$Q_{dem,i} = U_m * A * DD * 24[W * h] \quad (2)$$

➤ $Q_{dem,i}$ [W*h] θερμικές απώλειες κτιρίου,

- $U_m \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτιρίου,
- $A \quad [m^2]$ επιφάνεια του κτιρίου,
- $DD \quad [K]$ βαθμοήμερες θέρμανσης

Πίνακας 3 : Συνολικές θερμικές απώλειες για τις εγκαταστάσεις (Q_{dem}, kWh)	
Τμήμα I	267.767,8
Τμήμα II	314.198
Κτίριο Δ	125.305,6
Σύνολο	707.271,4

Τέλος η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση, για βαθμό απόδοσης λέβητα $\eta_{gen} = 0,944$, για απώλειες δικτύου διανομής $\eta_{is} = 0,96$ και για απώλειες τερματικών μονάδων $\eta_{em} = 0,85$ (σύμφωνα με την ενεργειακή επιθεώρηση που διενεργήθηκε [16]), υπολογίστηκε $Q_{cons} = 895.280,3 kWh$ και προέρχεται διαιρώντας το σύνολο των θερμικών απωλειών με τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος θέρμανσης. Η θεωρητική κατανάλωση είναι της τάξεως των 87.334,2 l πετρελαίου, με βάση τη θερμογόνο δύναμη και την πυκνότητα του πετρελαίου θέρμανσης. Σύμφωνα με στοιχεία τιμολόγησης από την τεχνική υπηρεσία του Πανεπιστημίου, η κατανάλωση πετρελαίου ανήλθε στα 81.392 l για την περίοδο 1/1/2015-3/12/2015. Η εν λόγω απόκλιση λοιπόν της τάξεως του 6%, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ικανοποιητική δεδομένου του μεγέθους του κτιρίου και των αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν αντίστοιχους υπολογισμούς.

2.5 Ενεργειακή αναβάθμιση

Στα πλαίσια της ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου, το πρώτο στάδιο είναι η επιλογή κατάλληλης θερμομόνωσης. Ως μονωτικό υλικό επιλέχθηκε ο πετροβάμβακας (σκληρές πλάκες για τα κάθετα δομικά στοιχεία και ρολό για τα οριζόντια). Ταυτόχρονα θα αντικατασταθούν τα διαφανή δομικά στοιχεία με καινούργια, καλύτερης ενεργειακής συμπεριφοράς. Σκοπός είναι να καλυφθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις του Κ.ΕΝ.Α.Κ.(ΤΟΤΕΕ 20701-2/2010 [13]) για την Δ κλιματική ζώνη.

Για τα κουφώματα επιλέχθηκε κούφωμα με ποσοστό πλαισίου 20% και ενεργειακούς υαλοπίνακες με διάκενο 10mm και πλήρωση με ατμοσφαιρικό αέρα, με $U = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$.

Για τον υπολογισμό του κατάλληλου πάχους θερμομόνωσης χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεθοδολογία με τον καθορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας των κάθετων δομικών στοιχείων.

Στη συνέχεια κρίθηκε απαραίτητο να αντικατασταθεί το ήδη υπάρχον σύστημα θέρμανσης με λέβητα πετρελαίου. Αποφασίστηκε να εγκατασταθούν γεωθερμικές Α/Θ, λόγω του υψηλού θερμικού βαθμού απόδοσης καθώς και των ακραίων καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Η διαστασιολόγηση των αντλιών έγινε με βάση τις χειρίστες συνθήκες, οι οποίες προκύπτουν από το μέγιστο μηνιαίο φορτίο κάθε τμήματος, προς τις ημέρες λειτουργίας που έχουν υπολογιστεί, διαιρεμένο με 24 ώρες.

Οι Α/Θ θα παράγουν ζεστό νερό στους 65 °C ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ήδη υφιστάμενα θερμαντικά σώματα (καλοριφέρ) και θα τροφοδοτούν παράλληλα τα δύο δοχεία ζεστού νερού που θα εγκατασταθούν, συνολικής χωρητικότητας 1000 l, για την κάλυψη των αναγκών του εστιατορίου σε ζεστό νερό χρήσης. Σημειώνεται ότι οι επιλεγόμενες συσκευές (εταιρεία κατασκευής Carrier, τύπος 61WG) είναι δυνατό να λειτουργήσουν στις συγκεκριμένες συνθήκες για το φορτίο χρήσης, όπως υποδεικνύουν και οι χρησιμοποιούμενοι στη συνέχεια βαθμοί απόδοσης.

Οι ανάγκες του κτιρίου σε ψύξη είναι εξαιρετικά περιορισμένες, με γνώμονα τα χαρακτηριστικά της κλιματικής ζώνης Δ αλλά και την μη λειτουργία του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Σε κάθε περίπτωση η Α/Θ του Τμήματος II θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες ψύξης του Κεντρικού Αμφιθεάτρου, σε σύνδεση με το εγκατεστημένο σύστημα εξαερισμού για το χώρο αυτό.

Σε μια προσπάθεια περαιτέρω μείωσης των ενεργειακών καταναλώσεων, θεωρείται δόκιμο να αντικατασταθούν οι υφιστάμενοι λαμπτήρες με νέους, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, λαμπτήρες LED. Τέλος λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος έγινε μια διερεύνηση για εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από Φ/Β υπολογίζεται από τον τύπο που προτείνεται από την ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 [16]:

$$Q_{PV} = CF_{sol} * A_{PV} * I [kWh] \quad (3)$$

- Q_{PV} [kWh] η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό,
- CF_{sol} [-] ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας,
- A_{PV} [m²] η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού,
- I [kWh/m²] η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.6 Διαστασιολόγηση γεωεναλλάκτη

Για τον υπολογισμό του μήκους του γεωεναλλάκτη, αλλά και του αριθμού των γεωτρήσεων και βάθους κατακόρυφης γεωθερμίας, εφαρμόζεται η κατάλληλη μεθοδολογία που προτείνει η ASHRAE [11]. Η μεθοδολογία απαιτεί την απαιτούμενη ετήσια ροή θερμότητας από/προς το έδαφος, η οποία υπολογίζεται στη βάση των θερμικών ενεργειακών φορτίων και των αντίστοιχων εποχιακών βαθμών απόδοσης της αντλίας θερμότητας. Το μήκος της γεώτρησης είναι συνάρτηση του θερμικού φορτίου, της θερμικής αντίστασης του εδάφους και του σωλήνα τη γεώτρησης και των εμπλεκόμενων θερμοκρασιών εδάφους και εισόδου/εξόδου νερού στον γεωεναλλάκτη [11].

Για τη Φλώρινα τα χαρακτηριστικά του εδάφους που υιοθετήθηκαν είναι θερμική αγωγιμότητα $K_{ground} = 1,2 \frac{W}{m \cdot K}$ [17] και θερμοκρασία $T_{ground} = 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ [14].

2.7 Οικονομική ανάλυση

Η οικονομική ανάλυση περιλαμβάνει τη διερεύνηση βιωσιμότητας των επεμβάσεων που προτάθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η αποτίμηση γίνεται με την μέθοδο της απλής περιόδου αποπληρωμής, η οποία κρίνεται επαρκής για το απαιτούμενο επίπεδο ανάλυσης της εν λόγω διερεύνησης. Απαιτούμενα δεδομένα αποτελούν το αρχικό κόστος της επέμβασης (συμπεριλαμβανομένου και του κόστους εγκατάστασης), καθώς επίσης και το κόστος ενέργειας για την τρέχουσα περίοδο της μελέτης ή της εγκατάστασης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αποτελέσματα θερμομόνωσης

Για την θερμομόνωση των αδιαφανών στοιχείων επιλέχθηκε ως μονωτικό υλικό ο πετροβάμβακας. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για σκληρή πλάκα πετροβάμβακα είναι $\lambda=0,039$ (W/mK), ενώ για ρολό είναι $\lambda=0,029$ (W/mK). Ως αποτέλεσμα της μόνωσης του κτιρίου και αντικατάστασης των διαφανών δομικών στοιχείων, ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κτιρίου παρουσιάζει τις εξής τιμές (πίνακας 4) :

Πίνακας 4 : Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας U_m , $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ των τμημάτων του κτιρίου μετά τις επεμβάσεις στο κέλυφος			
	Ισόγειο	1 ^{ος} όροφος	2 ^{ος} όροφος
Τμήμα I	0,64	0,52	-
Τμήμα II	0,7	0,56	-
Κτίριο Δ	0,66	0,63	0,51

Πλέον, οι θερμικές απώλειες υπολογίστηκαν εκ νέου και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5 : Θερμικές απώλειες κτιρίου μετά την επέμβαση στο κέλυφος (Q_{dem} , kWh)	
Τμήμα I	151.296,3
Τμήμα II	180.787,2
Κτίριο Δ	61.771,5
Σύνολο	394.855

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση υπολογίστηκε $Q_{\text{cons}} = 499.816,5 \text{ kWh}$, η οποία ανάγεται σε θεωρητική κατανάλωση της τάξεως των 48.756,9 l πετρελαίου. Επιτυγχάνεται δηλαδή μείωση της τάξης του 44,1%.

3.2 Επιλογή αντλιών θερμότητας

Η διαστασιολόγηση των συσκευών έγινε με βάση τις δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες για την πόλη της Φλώρινας, και τον αντίστοιχο υπολογισμό του θερμικού φορτίου για αυτές. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6 : Ισχύς γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

Χώρος	Ισχύς [kW]
Τμήμα I	69,9
Τμήμα II	83,5
Κτίριο Δ	26,1

3.3 Διαστασιολόγηση γεωεναλλάκτη

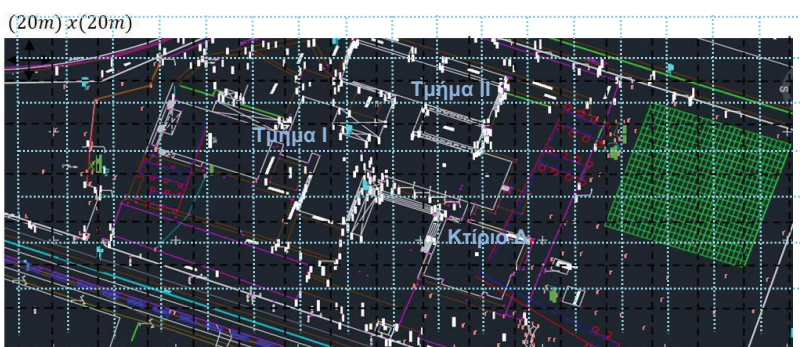
Επιλέχθηκε η χρήση σωλήνων πολυαιθυλενίου HYDROLIFE 3^{ns} γενιάς PE 100. Σύμφωνα με τα λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης, υπολογίστηκε εξωτερική διάμετρος 32 mm και εσωτερική διάμετρος 26 mm για τους αγωγούς [11].

Το απαιτούμενο μήκος του γεωεναλλάκτη για τα τμήματα I, II και το κτίριο Δ παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Διαστασιολόγηση γεωεναλλάκτη

	Αριθμός Γεωτρήσεων	Μήκος γεωεναλλάκτη [m]	Βάθος γεώτρησης [m]	Απαιτούμενη επιφάνεια [m ²]
Τμήμα I	13	3.919,8	76	400
Τμήμα II	16	4.777,1	75	400
Κτίριο Δ	5	1.486,1	75	120

Στην εικόνα 2 απεικονίζεται η έκταση της προτεινόμενης επέμβασης. Συγκεκριμένα με κόκκινο και μπλε απεικονίζονται οι γεωτρήσεις για τα τμήματα I, II και το κτίριο Δ. Η μπλε γραμμή απεικονίζει τους σωλήνες προσαγωγής κρύου νερού, ενώ η κόκκινη τους σωλήνες επιστροφής ζεστού νερού. Οι γεωτρήσεις περιλαμβάνουν τρία πεδία, για τα κτίρια I, II και Δ αντίστοιχα. Με πράσινο απεικονίζεται η έκταση που θα καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ.



Εικόνα 2 : Κάτοψη παιδαγωγικής σχολής με τοποθέτηση γεωεναλλάκτη και Φ/Β πάρκο (πλέγμα 20 m x 20 m)

3.4 Αντικατάσταση λαμπτήρων

Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 [16] οι απαιτήσεις φωτισμού για ένα κτίριο Τριτοβάθμιας εκπαίδευσης είναι 2.817 ώρες λειτουργίας. Άρα οι υφιστάμενοι λαμπτήρες είναι υπεύθυνοι για την

Συνεπώς, η κατανάλωση ρεύματος λόγω φωτισμού μετά την επέμβαση εξοικονόμησης θα είναι 98.693,19 kWh, οδηγώντας σεπολύ σημαντική μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος (89.771,05 kWh).

3.5 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ

Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στις εγκαταστάσεις της Παιδαγωγικής Σχολής είναι ιδιαίτερα υψηλή, αναφέροντας χαρακτηριστικά πραγματική κατανάλωση για το έτος 2016 ίση με 243.629,3 kWh (σύμφωνα με στοιχεία τιμολόγησης από την τεχνική υπηρεσία του Πανεπιστημίου). Συνεπώς θεωρείται δόκιμη η διερεύνηση εξοικονόμησης συμβατικής ενέργειας με χρήση Φ/Β συστημάτων. Ειδικότερα, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, επιλέχθηκε φωτοβολταϊκό πάνελ της αγοράς, με ονομαστική ισχύ 260 W. Για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πάνελ:

$$CF_{\text{sol}} = 0,158$$

$$A_{\text{PV}} = 1,64 \text{ m}^2$$

Επίσης για την περιοχή της Φλώρινας από μετεωρολογικά δεδομένα [14]:

$$I = 1340 \text{ kWh/m}^2 \text{ ανά έτος.}$$

Από τον αρχικό τύπο προκύπτει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για ένα πάνελ ALEO P18J260, για την περιοχή της Φλώρινας, για βέλτιστη κλίση και προσανατολισμό, σε ένα έτος θα είναι:

$$Q_{\text{PV}} = 0,158 * 1,64 * 1340 = 347,22 \text{ kWh}$$

Θεωρώντας ότι θα καλυφθούν εξολοκλήρου οι ηλεκτρικές καταναλώσεις (συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτρικού ρεύματος που θα καταναλώνουν οι Α/Θ) οι οποίες ανέρχονται σε 237.192,67 kWh προκύπτει ότι θα εγκατασταθούν:

$$\frac{237.192,67}{347,22} = 683,11 \approx 684 \text{ πάνελ}$$

Η λειτουργία των Φ/Β προβλέπεται να γίνει σύμφωνα με τη διαδικασία netmetering. Φυσικά στα πλαίσια πραγματικής λειτουργίας, η κάλυψη του φορτίου θα διαφοροποιηθεί.

Σχετικά με τη δέσμευση επιφάνειας για την εγκατάσταση των παραπάνω πάνελ, απαιτούνται 3,5 στρέμματα. Αν και η οροφή κρίνεται επαρκής, λόγω της μεγάλης απαιτούμενης επιφάνειας προτιμήθηκε να διερευνηθεί και η περίπτωση τοποθέτησης στο έδαφος (εικόνα 2).

3.6 Οικονομική ανάλυση

3.6.1 Κόστος επεμβάσεων

Στον πίνακα 9 παρουσιάζεται το συνολικό κόστος της επέμβασης για την Παιδαγωγική Σχολή. Σημειώνεται ότι οι τιμές κόστους που αναφέρονται στην παρούσα ενότητα προέκυψαν από έρευνα που έγινε και αναφέρονται σε πραγματικές τιμές των προϊόντων που επιλέχθηκαν.

Πίνακας 9 : Κόστος επεμβάσεων στην Παιδαγωγική Σχολή

	Κόστος Θερμομόνωσης €	Κόστος Αντικατάστασης κουφωμάτων (320 €/m ²)	Κόστος Αγοράς Αντλιών €	Κόστος Αγοράς Δοχείων ΖΝΧ€	Κόστος Εγκατάστασης Γεωεναλλάκτη €	Κόστος Αντικατάστασης Λαμπτήρων €	ΦΒ
Τμήμα I	11.858,9	136.892,8€	18.282,8	HPC1-500: 990,9x2	71.526,0	LED T8 14W 8€ x 2335 (τεμάχια)	-
Τμήμα II	11.952,1	193.682,8€	19.358,1	ER-HPC-3,5:71,2x2	87.360,0	LED τύπου νήματος 40 W 43 € x 48 (τεμάχια)	-
Κτίριο Δ	12.268,4	89.225,6€	12.002,0	-	27.000,0	LED προβολείς 50W 45€ x 8 (τεμάχια)	-
Οροφή	20.054,3	-	-	-	-	-	300€/τμχx 684 τμχ
Σύνολο	56.133,4	419.901,2€	49.642,9	2.124,1	185.886,0	21.104	205.200,0

3.6.2 Απόσβεση μόνωσης και εγκατάστασης νέου συστήματος θέρμανσης

Το συνολικό κόστος ανέρχεται στις 713.713,19 €. Η ετήσια κατανάλωση πετρελαίου για τις εγκαταστάσεις της Παιδαγωγικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στη Φλώρινα υπολογίστηκε 87.334,2 l. Θεωρώντας ότι η μέση τιμή του πετρελαίου θέρμανσης στην αγορά, κυμαίνεται στα 0,95 €/l, το συνολικό κόστος λειτουργίας για ένα χρόνο ανέρχεται στις 82.967,5 €. Στο παραπάνω ποσό χρημάτων θα πρέπει να προστεθεί και το κόστος συντήρησης του υφιστάμενου συστήματος θέρμανσης, το οποίο ανέρχεται στα 200 €/λέβητα, καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης των αντλιών θερμότητας, τα οποία ανέρχεται στα 500 €. Άρα το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης του υφιστάμενου συστήματος για ένα χρόνο ανέρχεται στις 83.567,5 €. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να γίνει απόσβεση χρημάτων:

$$\text{Χρόνια απόσβεσης} = \frac{713.713,19}{83.567,5 - 500} = 8,6 \text{ χρόνια}$$

3.6.3 Απόσβεση συστήματος φωτισμού

Όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 3.3, το υφιστάμενο σύστημα φωτισμού καταναλώνει ετησίως 188.464,24 kWh. Η τιμή αγοράς ανά kWh από την ΔΕΗ είναι 0,1771 €. Άρα το ετήσιο κόστος λειτουργίας του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού ανέρχεται στις 33.377,01 €. Το σύστημα φωτισμού που προτείνεται θα καταναλώνει ετησίως 98.693,19 kWh και θα κοστίζει 17.478,56 €. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να γίνει απόσβεση χρημάτων:

$$\text{Χρόνια απόσβεσης} = \frac{21.104}{33.377,01 - 17.478,56} = 1,32 \text{ χρόνια}$$

3.6.4 Απόσβεση φ/β πάνελ

Μετά την αντικατάσταση του συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες LED χαμηλής κατανάλωσης και την εγκατάσταση αντλιών θερμότητας, η ετήσια κατανάλωση ρεύματος θα είναι 237.192,67 kWh. Η τιμή αγοράς ανά kWh από την ΔΕΗ είναι 0,1771 €. Άρα το ετήσιο κόστος θα ανέρχεται στις 42.006,8 €. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να γίνει απόσβεση χρημάτων είναι:

$$\text{Χρόνια απόσβεσης} = \frac{205.200}{42.006,8} = 4,88 \text{ χρόνια}$$

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιλογή εύχρηστων μεθοδολογικών εργαλείων για το σχεδιασμό της ενεργειακής αναβάθμισης ενός μεγάλης έκτασης Δημόσιου κτιρίου πανεπιστημιακής χρήσης έδωσε τη δυνατότητα αξιολόγησης των ενεργειακών παρεμβάσεων. Τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν κατά το δυνατό από διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα της χρήσης του κτιρίου, σημειώνοντας ωστόσο την περιορισμένη διαθεσιμότητα στοιχείων.

Έμφαση δόθηκε στην αξιοποίηση αβαθούς γεωθερμίας για τις χρήσεις θέρμανσης (και ζεστού νερού χρήσης), με δεδομένα τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τη διερεύνηση δυνατότητας περιορισμού της συμβατικής κατανάλωσης ενέργειας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, το συνολικό κόστος των παρεμβάσεων ανέρχεται στο ποσό των 940.017,2 €. Απαιτείται ένα μεγάλο αρχικό κεφάλαιο, όμως μέσα σε 8 περίπου χρόνια, ολόκληρο αυτό το ποσό θα έχει αποσβεστεί και πλέον δεν θα δαπανούνται καθόλου χρήματα για την λειτουργία του Πανεπιστημίου. Επιπλέον θα πρόκειται για ένα «πράσινο» κτίριο, μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς πλέον το 100% των ενεργειακών καταναλώσεων του Πανεπιστημίου θα προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΕ, 2002. ΟΔΗΓΙΑ 2002/91/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων 2002/91/ΕΕ.
- [2] ΕΕ, 2010. ΟΔΗΓΙΑ 2010/31/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων
- [3] ΕΕ, 2012. ΟΔΗΓΙΑ 2012/27/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 25ης Οκτωβρίου 2012 για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ
- [4] ΕΚ, 2009. ΟΔΗΓΙΑ 2009/28/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 23ης Απριλίου 2009 σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ
- [5] UN, 1987. Our Common Future / Brundtland Report. World Commission on Environment and Development.
- [6] Lozano R., Lukman R., Lozano FJ., Huisingh D., Lambrechts W., 2013. Declarations for sustainability in higher education: becoming better leaders, through addressing the university system. *Journal of Cleaner Production* 48, 10-19
- [7] Sammalisto K., Sundstrom A., Holm T., 2015 Implementation of sustainability in universities as perceived by faculty and staff e a model from a Swedish university. *Journal of Cleaner Production* 106, 45-54
- [8] Karatzoglou B., 2013 An in-depth literature review of the evolving roles and contributions of universities to Education for Sustainable Development. *Journal of Cleaner Production* 49, 44-53
- [9] Malandrakis G., Panaras G., Papadopoulou P., 2017. Assessing the sustainability of the University of Western Macedonia. *Procedia Environmental Sciences* 38, 890-897
- [10] Μενδρινός Δ., Καρύτσας Κ., 2005. Γεωθερμία, Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, Εμπειρία ΚΑΠΕ. Πανελλήνιος Σύλλογος Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.
- [11] Karanaugh S., Rafferty K., 2014. Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems. ASHRAE. Atlanta
- [12] ASHRAE, 2009. ASHRAE Handbook: Fundamentals. Atlanta
- [13] ΤΕΕ, 2010. Τεχνική Οδηγία ΤΟΤΕΕ 20701-2. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων
- [14] ΤΕΕ, 2010. Τεχνική Οδηγία ΤΟΤΕΕ 20701-3. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών.
- [15] Παπακώστας Κ., Τσιλιγκρίδης Γ., Κυριακής Ν., 2005. Βαθμομέρες Θέρμανσης 50 Ελληνικών Πόλεων. Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, 25 (1-2), 51-65
- [16] ΤΕΕ, 2010. Τεχνική Οδηγία ΤΟΤΕΕ 20701-1. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για το υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.
- [17] Πρόγραμμα Thermomap, FP7: Περιοχική χαρτογράφηση των ρηχών γεωθερμικών πόρων από δεδομένα εδάφους και υπόγειων νερών.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ: ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΝΕΑΠΟΛΗΣ-ΣΥΚΕΩΝ

Χ. Σοφοπούλου^{1*}, Αικ. Μερέση¹,

¹Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών, πάροδος Αριστοτέλους
18, 26335 Πάτρα
e-mail: sofochris@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σημερινή εποχή βιώνουμε τις κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, λόγω της αλόγιστης χρήσης ρυπογόνων ενεργειακών πόρων. Καθώς ο κτιριακός τομέας ανήκει στους ιδιαίτερα ενεργοβόρους τομείς, γίνεται σημαντική προσπάθεια για τη δημιουργία κτιρίων που θα είναι ενεργειακά αποδοτικά, ενώ παράλληλα θα εξασφαλίζουν στους χρήστες τις βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης. Παρά ταύτα, αρκετά κτίρια που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις αρχές του περιβαλλοντικού σχεδιασμού, αποτυγχάνουν να εκπληρώσουν τους αρχικούς τους στόχους, όπως αυτοί τέθηκαν κατά το στάδιο της μελέτης τους, αφήνοντας τους χρήστες ανικανοποίητους, καθώς διαπιστώνουν ότι οι συνθήκες άνεσης δεν ανταποκρίνονται στις ανάγκες τους.

Το κενό ανάμεσα στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία του κτιρίου έρχονται να καλύψουν οι μελέτες Post Occupancy Evaluation (POE), φιλοδοξώντας να αποτελέσουν το εργαλείο που θα συμβάλει σε ένα ολιστικό πνεύμα προσέγγισης του κτιρίου, το οποίο παράλληλα θα προσεγγίζει πιο πετυχημένα τις αρχές της αιφόρου ανάπτυξης. Οι μελέτες POE αποτελούν μελέτες αξιολόγησης ενός κτιρίου από την οπτική σκοπιά των εμπλεκόμενων με το κτίριο. Πραγματοποιούνται αφού έχει παρέλθει ένα διάστημα από την κατασκευή και την έναρξη χρήσης του κτιρίου, με σκοπό να προκύψουν, μέσω των χρηστών, χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του.

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται η πραγματοποίηση μια μελέτης POE σε δύο δημόσια κτίρια του Δήμου Νεάπολης-Συκεών (Ν. Θεσσαλονίκης) με βιοκλιματικά χαρακτηριστικά: ένα δημοτικό σχολείο και ένα κτίριο ΚΑΠΗ (Πνευματικό Δημοτικό κέντρο/ ΚΑΠΗ/ ΚΗΦΗ) . Κύριος στόχος της έρευνας ήταν η ανάδειξη των σημαντικών θεμάτων από την σκοπιά των χρηστών, αναφορικά με τη χρήση και τη λειτουργία των κτιρίων. Η μελέτη είναι ενδεικτικού τύπου, δηλαδή παρέχει μια συνοπτική εικόνα του βιοκλιματικού χαρακτήρα του κάθε κτιρίου και επιχειρεί να συγκεντρώσει τα σημαντικότερα στοιχεία της απόδοσής τους. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω επιτόπιας αυτοψίας, ερωτηματολογίων και άτυπης συνέντευξης με τους χρήστες, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε μελέτη σκίασης-ηλιασμού και για τα δυο κτίρια, καθώς και μελέτη φυσικού φωτισμού για το κτίριο των ΚΑΠΗ.

Τα ευρήματα της έρευνας κατέδειξαν διάφορα θέματα που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις ομάδες: της μελέτης, της κατασκευής, καθώς και της χρήσης. Προέκυψε πως οι χρήστες του σχολικού κτιρίου, που αποτελεί υπόδειγμα βιοκλιματικής μελέτης, εμφανίζονται πιο δυσαρεστημένοι από τους χρήστες του κτιρίου των ΚΑΠΗ που δεν παρουσιάζει την πληθώρα των βιοκλιματικών στοιχείων του πρώτου. Το γεγονός ότι στο σχολικό κτίριο οι χρήστες δεν ενημερώθηκαν για τη λειτουργία και χρησιμότητα των βιοκλιματικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν, επηρέασε αρνητικά την άποψή τους για το κτίριο, καθώς και το αίσθημα ικανοποίησης.

Λέξεις Κλειδιά: Θερμική και οπτική άνεση, μελέτες POE, βιοκλιματικά κτίρια

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μελέτες POE (Post Occupancy Evaluation Studies) είναι μελέτες αξιολόγησης κτιρίων, μετά την εγκατάσταση των χρηστών σε αυτά και κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Δεν αποτελούν καινούρια έννοια, καθώς ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '60 είχαν εμφανιστεί στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ενώ αρχικά οι POE αφορούσαν αξιολογήσεις που επικεντρώνονταν μόνο στην απόδοση του κτιρίου ή μόνο στην εμπειρία του χρήστη, τώρα πλέον κατευθύνονται προς ένα ολιστικό σύστημα αξιολόγησης, βασισμένο σε διαδικασίες και βήματα [1&2]. Οι μελέτες POE δεν είναι μονόπλευρες: το αποτέλεσμα της μελέτης εξαρτάται από το πού απευθύνεται, για ποιον γίνεται, τι αφορά και σε ποια φάση υλοποίησης του έργου γίνεται. Συνεπώς οι σκοποί διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη [2]. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη POE αποτελεί μια αξιολόγηση του κτιρίου από διάφορους εμπλεκόμενους με το κτίριο (χρήστες κτιρίου, μελετητές, διαχειριστές κ.τ.λ.), που πραγματοποιείται αφού έχει περάσει κάποιο διάστημα από την εγκατάσταση των χρηστών στο κτίριο και μετά την έναρξη χρήσης του. Η αξιολόγηση αφορά τόσο τεχνικά στοιχεία της εγκατάστασης όσο και μη τεχνικά στοιχεία που έχουν να κάνουν με τον ανθρώπινο παράγοντα, και οδηγεί στον εντοπισμό ατελειών και αδυναμιών λειτουργώντας ως μηχανισμός ανατροφοδότησης για τους μελετητές.

Οι μελέτες POE κλείνουν το κενό ανάμεσα στη πρόθεση του σχεδιασμού και το αποτέλεσμα που προκύπτει στην πραγματικότητα [3]. Ένα σημαντικό όφελος που μπορεί να προκύψει από την εκπόνηση μια μελέτης POE είναι η ανάδειξη των αλληλοσχετίσεων ανάμεσα στις διάφορες κτιριακές λειτουργίες [4]. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές τις αλληλοσχετίσεις μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την μελέτη βιοκλιματικών κτιρίων. Μελέτες POE έχουν δείξει ότι σε κτίρια με συστήματα φυσικού αερισμού είναι αποδεκτές από τους χρήστες μεγαλύτερες θερμοκρασίες ως θερμική άνεση σε σχέση με τις αντίστοιχες κτιρίων με συστήματα κλιματισμού [5,6]. Τα πρότυπα δηλαδή θερμικής άνεσης κλιματιζόμενων με τεχνητά και με φυσικά συστήματα θα έπρεπε να διαφέρουν.

Σε σχέση με τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό κτιρίων, οι μελέτες μπορούν να αποδειχθούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, καθώς μπορούν να συμβάλουν στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης τόσο έμμεσα, συμβάλλοντας στον αποτελεσματικότερο μελλοντικό σχεδιασμό του, όσο και άμεσα μέσω των πιθανών βελτιώσεων των συστημάτων λειτουργίας του, εντοπίζοντας προβλήματα μετά την εγκατάσταση [3].

Συμπερασματικά η εκπόνηση μελετών POE μπορεί να λειτουργήσει υπέρ του περιβαλλοντικού σχεδιασμού κτιρίων με τους εξής τρόπους:

- Βοηθάει τον μελετητή να καταλάβει τις ανάγκες και την συμπεριφορά του χρήστη καθώς και να επανεξετάσει τις λύσεις που έχει επιλέξει ως προς την καταλληλότητα των αποφάσεων του.
- Αναδεικνύει την ανάγκη επανεξέτασης των προτύπων σχεδιασμού καθώς και του τρόπου χρήσης τους.
- Συμβάλλει στην ολιστική προσέγγιση της μελέτης και του σχεδιασμού.

Σταθμό για τις μελέτες POE, αποτέλεσε η μελέτη PROBE που πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο. Υπήρξε σημαντική καθώς ήταν η πρώτη οργανωμένη και καλά συντονισμένη διαδικασία αξιολόγησης κτιρίων, όπως και μια συνεργασία κρατικού και ιδιωτικού τομέα. Ξεκίνησε το 1995 και διήρκεσε ως το 2002, μελετήθηκαν νέα σε λειτουργία εμπορικά και δημόσια κτίρια, 2 έως 3 έτη μετά την έναρξη λειτουργίας τους. Τα κτίρια που επιλέχθηκαν είχαν σχεδιαστεί ώστε να έχουν χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και απόδοση πάνω από το μέσο όρο των κτιρίων στο Ηνωμένο Βασίλειο την εποχή που εκπονήθηκε η μελέτη. Η έρευνα, για μεγαλύτερη αξιοπιστία, βασίστηκε σε δυο καθιερωμένα ερευνητικά εργαλεία, τα οποία είναι:

- 1) Η μέθοδος έρευνας χρηστών που αναπτύχθηκε από την Building Use Studies Ltd (BUS) για τη μέτρηση της ικανοποίησης των χρηστών σε σχέση με το κτίριο και τις εσωτερικές συνθήκες του. Ειδικά για το ερωτηματολόγιο, δόθηκε μεγάλη προσοχή καθώς έπρεπε να μην είναι πολύ μεγάλο και χρονοβόρο στη συμπλήρωσή του αλλά να μπορεί να δίνει τις ζητούμενες πληροφορίες.
- 2) Ένα πρότυπο της Energy Assessment and Reporting Method's (EARMTM) Office Assessment Method για την ανάλυση της χρήσης της ενέργειας. Μελετήθηκαν δηλαδή ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία σε σχέση με τη χρήση του κτιρίου [7].

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω και στο πλαίσιο της εκπόνησης διπλωματικής εργασίας στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα "Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων" του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη POE σε δύο δημόσια κτίρια του Δήμου Νεάπολης-Συκεών (Ν.Θεσσαλονίκης) με βιοκλιματικά χαρακτηριστικά: ένα δημοτικό σχολείο και ένα

ΚΑΠΗ/πνευματικό κέντρο (χάρην συντομίας θα αποκαλείται κτίριο ΚΑΠΗ). Κύριος στόχος της έρευνας ήταν η ανάδειξη των σημαντικών θεμάτων από την σκοπιά των χρηστών, αναφορικά με τη χρήση και τη λειτουργία των κτιρίων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μελέτη ΡΟΕ που πραγματοποιήθηκε είναι ενδεικτικού τύπου [8]: παρουσιάζει με συνοπτικό τρόπο στοιχεία σε σχέση με το βιοκλιματικό χαρακτήρα του κάθε κτιρίου, επιχειρώντας να προσδιορίσει κατά πόσο λειτουργήσει το εκάστοτε κτίριο πετυχημένα από την οπτική πλευρά των χρηστών.

Η μεθοδολογία για την αξιολόγηση του κτιρίου περιλάμβανε τα εξής βήματα [2]:

- Αυτοψία γύρω από τα κτίρια και τις εγκαταστάσεις τους, με σκοπό τον εντοπισμό εμφανών θεμάτων και προβλημάτων του κτιρίου.
- Συνεντεύξεις με αυτούς που επιτελούν ρόλο διαχειριστή για τα κτίρια: την διευθύντρια του δημοτικού σχολείου και την υπεύθυνη των ΚΑΠΗ.
- Ομαδικές συναντήσεις με τους δασκάλους του σχολείου / εργαζόμενους των ΚΑΠΗ.
- Διανομή ερωτηματολογίου στους χρήστες των δυο κτιρίων αναφορικά με τις συνθήκες άνεσης μέσα στα κτίρια.

2.1. Αυτοψία

Η αυτοψία στα κτίρια πραγματοποιήθηκε τις πρωινές ώρες λειτουργίας των κτιρίων. Κατά τη διάρκεια της, τα δύο κτίρια υπό μελέτη επιθεωρήθηκαν (στο βαθμό που υπήρχε προσβασιμότητα) εσωτερικά και εξωτερικά και συλλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία τους. Σκοπός ήταν να προσδιοριστεί εάν και σε ποιο βαθμό υπάρχουν κάποια σημαντικά προβλήματα ή δράσεις που οδηγούν σε σπατάλη ενέργειας και συνεπώς επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

2.2. Ερωτηματολόγια-Συνέντευξη

Το ερωτηματολόγιο βασίστηκε σε αυτό της μεθοδολογίας BUS, και προσαρμόστηκε στις ανάγκες και ιδιαιτερότητες της συγκεκριμένης έρευνας οπότε δημιουργήθηκε ένα ερωτηματολόγιο συνθηκών άνεσης που χωρίζεται σε οκτώ ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει γενικά στοιχεία όπως η ηλικία και το γένος του χρήστη, οι ώρες και μέρες παραμονής στο κτίριο, η θέση εργασίας του μέσα στο κτίριο, η δραστηριότητά του καθώς η σχέση του με τα συστήματα ψύξης-θέρμανσης. Οι υπόλοιπες ενότητες αφορούν τη θερμική άνεση, την ποιότητα του αέρα, τον θόρυβο, τον φυσικό και τεχνητό φωτισμό, καθώς και τον έλεγχο των προαναφερόμενων συνθηκών άνεσης. Στις ενότητες αυτές χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των απαντήσεων «κλειστού τύπου» σε κλίμακα 7 σημείων.

Στη συνέντευξη και στις ομαδικές συναντήσεις αντίστοιχα ακολουθήθηκε ένα γενικό σχεδιάγραμμα λαμβάνοντας υπόψη όμως παράλληλα το τι παραπάνω ήθελαν να προσθέσουν οι χρήστες.

Στο σχολείο επιστράφηκε συμπληρωμένο, το 100% των ερωτηματολογίων (σύνολο 9 στον αριθμό). Τα εννιά άτομα αυτά, απαρτιζόνταν από τους δασκάλους των έξι τάξεων του δημοτικού, την διευθύντρια καθώς και τις δασκάλες των αγγλικών και μουσικής.

Στο ΚΑΠΗ δόθηκαν ερωτηματολόγια στις διάφορες ομάδες ατόμων που το χρησιμοποιούν: εργαζόμενοι στα γραφεία του ισογείου και δευτέρου ορόφου, εργαζόμενοι στα ΚΗΦΗ (Κέντρα Ημερήσιας Φροντίδας Ηλικιωμένων) του πρώτου ορόφου, συνταξιούχοι που βρίσκονται στο χώρο του καφενείου και προσωπικό που εργάζεται στο υπόγειο. Από τα γραφεία όλοι οι εργαζόμενοι επέστρεψαν συμπληρωμένα τα ερωτηματολόγια ενώ από το καφενείο και τον χώρο υπόγειο πάρθηκε μόλις ένα δείγμα. Από τους χρήστες των ΚΗΦΗ το δείγμα περιορίστηκε σε εργαζόμενους καθώς οι ηλικιωμένοι αυτών των εγκαταστάσεων είναι άνθρωποι με σοβαρά προβλήματα υγείας και η πρόσβαση σε αυτούς δεν ήταν εφικτή.

2.3. Διευκρινίσεις και περιορισμοί

Για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα ερωτηματολόγια χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Excel. Ως ώρες χρήσης των κτιρίων θεωρήθηκε το χρονικό διάστημα μεταξύ 08:00 και 15:30. Η έρευνα αντιμετώπισε κάποιους περιορισμούς και αδυναμίες. Λόγω της χρήσης των κτιρίων κάποια δεδομένα κρίθηκαν ευαίσθητα. Έτσι ενώ μαθητές αποτελούν τους βασικούς χρήστες του σχολικού κτιρίου, δεν θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην έρευνα.

Αντίστοιχα δεν συμπεριελήφθησαν και οι χρήστες των ΚΗΦΗ στο άλλο κτίριο. Η λήψη φωτογραφιών από το εσωτερικό των χώρων ήταν περιορισμένη ύστερα από παράκληση των υπεύθυνων και των δύο κτιρίων. Τέλος ακόμη και η παραχώρηση λογαριασμών θέρμανσης δεν κατέστη δυνατή.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

Τα υπό μελέτη κτίρια (Εικ1) βρίσκονται στο δήμο Νεάπολης-Συκεών που ανήκει στο νομό Θεσσαλονίκης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Πρόκειται για το 8ο Δημοτικό σχολείο Συκεών επί των οδών Β.Ηπειρού και Καραϊσκάκη και για το Γ' ΚΑΠΗ-Πνευματικό Δημοτικό κέντρο επί των οδών Περγάμου και Μεσολογίου.



Εικόνα 1. Χάρτης Περιοχής Υπό Μελέτη Κτιρίων (Πηγή: <http://www.googlemaps.com/>)

Τα κύρια βιοκλιματικά χαρακτηριστικά των κτιρίων παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κύρια βιοκλιματικά χαρακτηριστικά των κτιρίων

ΚΥΡΙΑ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΤΙΡΙΩΝ	ΚΤΙΡΙΑ	
	ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ/ΚΑΠΗ
1.ΕΥΝΟΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΠΕΔΟ	v	v
2.ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΧΩΡΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ	v	v
3.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ	v	x
4.ΦΥΤΕΜΕΝΟ ΔΩΜΑ	v	Στην άνοψη του κτιρίου, πάνω από την μεταλλ κατασκευή και πάνω από τα ξύλινα στεγάστρα
5.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΓΚΟΛΩΝ ΓΙΑ ΦΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ	v	Πέργκολα στην βορεινή όψη
6.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΙΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ	Μόνιμες κάθετες στον ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό	x
7.ΚΑΜΙΝΑΔΕΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ	v	x
8.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Φωτοκύτταρα τουαλέτες,δεξαμενή συλλογής βρόχινου νερού	Φωτοκύτταρα τουαλέτες,boiler για ζεστο νερο
9.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ	v	v
10.ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	v	v
11.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΥΦΩΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΔΙΠΛΟΥΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ	v	v
12.ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	Αντλία θερμότητας στην αίθουσα εκδηλώσεων Χρωματισμοί με οικολογικά χρώματα Χρήση τοπικών υλικών	Τοποθέτηση ξύλινων στεγάστρων στην ανατολική δυτική όψη Ανεμοφράκτης στο 1 ^ο όροφο στην δευτερεύσα είσοδο Δημιουργία ακάλυπτου χώρου στο όριο με διπλανό κτίριο για την βελτίωση του φωτισμ
		Στη δυτική όψη μελετήθηκε μια μεταλλικ αναρτόμενη κατασκευή με ξύλινα σκίαστρα ημιδιαφανείς στυρόμενες μεμβράνες σκιασμ

Πρόκειται για κτίρια που κατασκευάστηκαν μετά το 2009 και έχουν κοινό χαρακτηριστικό την προσαρμογή σε έδαφος με έντονες κλίσεις. Το σχολείο οργανώνεται σε πέντε στάθμες και οι κύριες όψεις του βρίσκονται στην ανατολική και δυτική πλευρά (Εικόνες 2.1-2.2). Οι αίθουσες διδασκαλίας, ξένων γλωσσών, ηλεκτρονικών υπολογιστών και βιβλιοθήκης έχουν τοποθετηθεί στην ανατολική πλευρά ενώ στη δυτική η κουζίνα, τραπεζαρία, wc, αποθήκες και γραφεία.



Εικόνες 2.1 και 2.2 Ανατολική και Δυτική όψη σχολείου

Αντίστοιχα το κτίριο των ΚΑΠΗ οργανώνεται σε πέντε επίπεδα (Εικόνες 3.1-3.2) και έχει όψεις στην ανατολική, δυτική και βορινή πλευρά του οικοπέδου ενώ στη νότια συνορεύει με το γειτονικό κτίριο και έχει χωροθετηθεί ακάλυπτος χώρος. Στα δυο κατώτερα επίπεδα (υπόγεια) προβλέφθηκαν σύμφωνα με την μελέτη χώροι στάθμευσης και αποθήκευσης ενώ στα υπόλοιπα και προς τα πάνω επίπεδα: γραφεία, βιβλιοθήκη, χώρος καφενείου-καθιστικού και WC, οι χώροι των ΚΗΦΗ και οι χώροι διοίκησης.



Εικόνες 3.1 και 3.2 Βορινή / Ανατολική και δυτική όψη κτιρίου ΚΑΠΗ

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Αυτοψία

Τα αποτελέσματα από την αυτοψία των δυο κτιρίων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: η πρώτη αφορά την τοποθέτηση μέσω ηλιοπροστασίας και την συνεχή λειτουργία του τεχνητού φωτισμού, η δεύτερη αφορά τα φυτεμένα δώματα και η τρίτη αλλαγές στοιχείων ως προς την μελέτη. Η πρώτη κοινή παρατήρηση λοιπόν, ήταν η τοποθέτηση εσωτερικών μέσω ηλιοπροστασίας (κουρτίνες και στόρια) και η συνεχής λειτουργία του τεχνητού φωτισμού (Εικόνες 4.1-4.3).



Εικόνα 4.1-4.2-4.3 Τυπικά ανοίγματα αίθουσα διδασκαλίας (σχολικό κτίριο), ισογείου και ορόφου (ΚΑΠΗ)

Η φύτευση των φυτεμένων δωματίων δεν φαίνεται να ακολουθεί κάποια μελέτη αλλά τυχαίες επιλογές (Εικόνα 5.1), ενώ τμήματα τους παραμένουν αφύτευτα. Υποβαθμίζεται έτσι ο βιοκλιματικός ρόλος αυτών των στοιχείων που αποτελούν βασικές παραμέτρους στο βιοκλιματικό σχεδιασμό.



Εικόνα 5.1 Φυτεμένο Δώμα ΚΑΠΗ

Τέλος, υπήρξαν αλλαγές σε σχέση με τις προβλεπόμενες μελέτες: αλλαγές χρήσης χώρων, αλλαγές στη χωροθέτηση κάποιων λειτουργιών, κατασκευή πρόσθετων στοιχείων από τη μια και από την άλλη μη κατασκευή κάποιων άλλων ή/και αντικατάσταση τους (αναλυτικά στους πίνακες 2 και 3).

4.2 Συνέντευξη

4.2.1 Σχολείο

Η συνέντευξη με την υπεύθυνη διαχείρισης του σχολείου ανέδειξε διάφορα θέματα. Ένα βασικό ήταν ότι το κτίριο παραδόθηκε χωρίς κάποια ενημέρωση/εκπαίδευση για τις βιοκλιματικές λειτουργίες. Ως αποτέλεσμα, κάποια στοιχεία παραμένουν ανενεργά (φωτοβολταϊκά συστήματα, δεξαμενή νερού, σύστημα σκίασης). Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την λειτουργία του αντιμετωπίστηκαν με επιτόπιες λύσεις, επεμβαίνοντας στην αρχική μελέτη: τοποθέτηση υγρομόνωσης, τοποθέτηση εσωτερικών μέσων ηλιοπροστασίας, τοποθέτηση κλιματιστικών μονάδων στη βιβλιοθήκη και αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, μεταφορά θερμοστάτη στο επίπεδο των γραφείων των καθηγητών. Η θέρμανση αποτελεί βασικό θέμα, καθώς υπάρχει ένας μοναδικός θερμοστάτης για όλο το κτίριο. Οι διαφορετικές ανάγκες κάθε αίθουσας σε σχέση με το σημείο του κτιρίου που βρίσκονται και με το ωράριο λειτουργίας τους, δεν καλύπτονται από τον υφιστάμενο τρόπο λειτουργίας της θέρμανσης. Αναλυτικότερα, οι αίθουσες βρίσκονται μοιρασμένες σε τρία επίπεδα ξεκινώντας από ένα επίπεδο κάτω από την στάθμη που βρίσκεται ο θερμοστάτης. Οι αίθουσες ειδικότητων που βρίσκονται στη τελευταία στάθμη (-11.00) για να θερμανθούν ικανοποιητικά προϋποθέτουν την λειτουργία θέρμανσης αρκετή ώρα πριν την λειτουργία τους και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια περιττή δαπάνη θέρμανσης για τις υπόλοιπες αίθουσες

και τα γραφεία. Επίσης ένα θέμα που προκύπτει με τη θέρμανση των χώρων αφορά και την λειτουργία του σχολείου. Καθώς το σχολείο λειτουργεί και σαν ολόημερο, κάποιες αίθουσες λειτουργούν και πέραν του ωραρίου λειτουργίας των μαθημάτων και δημιουργείται δίλλημα αναφορικά με τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Θα ήταν επιθυμητό η ύπαρξη θερμοστάτη ανά όροφο (ή ακόμη καλύτερα ανά αίθουσα).

Κάποιες διατάξεις εξοικονόμησης ενέργειας, όπως τα φωτοκύτταρα στις βρύσες, αντικαταστάθηκαν, καθώς τα παιδιά παίζανε συνεχώς με αποτέλεσμα να τα χαλάνε. Τέλος, επισημάνθηκε η αναπαρξία συστήματος ψύξης ή/και αερισμού. Οι ανάγκες σε δροσισμό καλύπτονται με τη χρήση ανεμιστήρων δαπέδου. Στην ερώτηση "αν ανεμιστήρες οροφής θα εξυπηρετούσαν" η διευθύντρια φάνηκε σκεπτική καθώς μας ανέφερε από εμπειρία συναδέλφων ότι δημιουργούσαν αναστάτωση στην αίθουσα καθώς και μικροατυχήματα.

4.2.2. ΚΑΠΗ

Η συνέντευξη με την υπεύθυνη του κτιρίου δεν ανέδειξε ιδιαίτερα θέματα, καθώς εμφανίστηκε πολύ ευχαριστημένη με τη λειτουργία του κτιρίου. Ο κάθε όροφος και χώρος έχει το δικό του θερμοστάτη και αυτό επιτρέπει στους χρήστες την ρύθμιση της θερμοκρασίας σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Κατά τη γνώμη της, τα συστήματα λειτουργούν καλά και ενημερώθηκαν από προσωπικό της τεχνική υπηρεσία του Δήμου για τον τρόπο χειρισμού τους. Η αντίστοιχη υπηρεσία του Δήμου είναι υπεύθυνη για τις φυτεύσεις στις πρασιές και τα φυτεμένα δώματα.

4.3. Συζήτηση με προσωπικό

4.3.1. Σχολείο

Το βασικό θέμα που αναδύθηκε από τη συζήτηση με το προσωπικό αφορά την μειωμένη θερμική άνεση. Κατά τους μήνες Ιούνιο και Σεπτέμβριο, η ζέση αποτελεί παράγοντα δυσφορίας, ενώ τα μέτρα για την αντιμετώπισή της περιορίζονται στο άνοιγμα των κουφωμάτων ή τη χρήση ανεμιστήρα. Αντίστοιχα η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις αίθουσες που βρίσκονται στην κατώτερη στάθμη σε σχέση με αυτές που βρίσκονται στις ανώτερες, κατά τους κρύους μήνες επηρεάζει την θερμική άνεση των χρηστών. Βασική επιθυμία είναι να υπήρχε θερμοστάτης σε κάθε αίθουσα, ώστε να μπορούν να ελέγχουν μόνοι τους τη θερμοκρασία της αίθουσας στην οποία βρίσκονται. Τέλος αναφέρθηκε η μειωμένη θερμική άνεση στην αίθουσα των πολλαπλών χρήσεων λόγω της μη ύπαρξης συστήματος θέρμανσης-ψύξης ως πρόσφατα. Αναφορικά με τις καμινάδες αερισμού, κάποιιοι δάσκαλοι ανέφεραν ότι μεταφέρεται η φωνή στην επάνω αίθουσα και δημιουργεί αναστάτωση στην αίθουσα.

4.3.2 ΚΑΠΗ

Η συζήτηση με τους εργαζόμενους επίσης δεν ανέδειξε ιδιαίτερα προβλήματα σχετικά με τη βιοκλιματική λειτουργία. Προέκυψαν κάποια θέματα που πιθανόν να σχετίζονται με την ατυχή τοποθέτηση κάποιων δραστηριοτήτων. Συγκεκριμένα, οι εργαζόμενοι στον υπόγειο χώρο εξέφρασαν την δυσαρέσκεια τους σε σχέση με το χώρο εργασίας όσον αφορά το φωτισμό, τη θερμική άνεση και την γενικότερη ποιότητα αέρα (ανέφεραν ενοχλητικές οσμές που υπάρχουν στον υπόγειο χώρο). Η ύπαρξη θερμοστάτη ανά χώρο και η δυνατότητα που έχουν οι περισσότεροι να ρυθμίζουν τη θερμοκρασία φάνηκε να είναι στοιχείο που ικανοποιεί ιδιαίτερα τους χρήστες.

Αναφορικά με την αυξημένη χρήση τεχνητού φωτισμού, στα γραφεία του ισογείου αυτό δικαιολογείται καθώς υπάρχει περιορισμένος αριθμός ανοιγμάτων, μικρών διαστάσεων και τοποθετημένα ψηλά στη τοιχοποιία. Στην ερώτηση «γιατί παραμένει μόνιμα ενεργοποιημένος ο τεχνητός φωτισμός στους υπόλοιπους χώρους για τα ΚΗΦΗ και καφενείο» η συνεχής λειτουργία αποδόθηκε στην προχωρημένη ηλικία των χρηστών και στην ανάγκη τους για περισσότερο φως. Στα γραφεία του δεύτερου ορόφου, παρόλο που υπάρχει αφθονία φυσικού φωτός (γεγονός που επαληθεύτηκε και από την αυτοψία αλλά και από την μελέτη φωτισμού σε ειδικό λογισμικό, η συνεχής λειτουργία του τεχνητού φωτισμού αποτελεί θέμα προβληματισμού. Οι εργαζόμενοι ισχυρίστηκαν ότι έτσι εργάζονται καλύτερα.

Αναφορικά με τη λειτουργία θέρμανσης και ψύξης, αναφέρθηκε ότι η θέρμανση λειτουργεί το χειμώνα αλλά και αρκετές μέρες την άνοιξη και τον χειμώνα ιδιαίτερα στους χώρους που χρησιμοποιούν οι ηλικιωμένοι. Ο κλιματισμός αντίστοιχα το καλοκαίρι δεν δουλεύει μόνιμα. Η αίσθηση πάντως μέσα στο κτίριο είναι ευχάριστη, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των ερωτηματολογίων. Οι περισσότεροι δήλωσαν ότι υπάρχει μια σταθερή ατμόσφαιρα. Οι εργαζόμενοι που δουλεύουν κοντά στα παράθυρα δεν νοιώθουν κάποια δυσφορία ή διαφορά θερμοκρασίας. Επίσης προσέρχονται στην εργασία τους με φυσιολογικό βαθμό ένδυσης.

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των άνω ενοτήτων παρουσιάζονται στους δυο που ακολουθούν.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα της επιτόπιας αυτοψίας/Συνεντεύξεων του Δημοτικού σχολείου.

ΚΥΡΙΑ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΙΑ / ΑΛΛΑΓΕΣ	ΛΟΓΟΙ ΑΙΤΙΟΛΟΓΙΑ/ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1.ΕΥΝΟΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΠΕΔΟ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
2.ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΧΩΡΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	Ο συγκεκριμένος προσανατολισμός δεν είναι ο πιο ευνοϊκός αλλά δεν υπάρχει δυνατότητα διαφορετικής τοποθέτησης στο οικοπέδο
3.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ	Σύμφωνα με τη μελέτη	Μη ενεργή κατάσταση	Μη ξεκάθαρη αρμοδιότητα
4.ΦΥΤΕΜΕΝΟ ΔΩΜΑ	Δεν πραγματοποιήθηκαν όλα σύμφωνα με την μελέτη	Ασφαλίστευση ενός προβλεπόμενου/Μη φροντισμένη φύτευση	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
5.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΙΓΚΟΛΩΝ ΠΑ ΦΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ	Δεν πραγματοποιήθηκαν όλα σύμφωνα με την μελέτη	Τοποθέτηση στεγαστρων που δεν προβλεπόταν από την μελέτη	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
6.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΙΩΔΩΝ ΣΤΑ ΚΟΥΦΟΜΑΤΑ-(Μόνιμες κάθεταις στον ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό)	Σύμφωνα με τη μελέτη	Τοποθετήθηκαν επιπλέον μέτρα ηλιοπροστασίας εσωτερικά από τους χρήστες	Ενδεχομένως κατασκευαστικό ή/και η μελέτη έληξε ενθουσιάζοντας
7.ΚΑΜΙΝΑΔΕΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ	Καταλήγουν ένα επίπεδο χαμηλότερα σε σχέση με την μελέτη	Κατά τους χρήστες,σε κάποιες αίθουσες υπάρχει μετάδοση θερμότητας	Ενδεχομένως κατασκευαστικοί
8.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-(Φωτοκύτταρα τουαλέτες,δεξαμενή συλλογής βρόχινου νερού)	Σύμφωνα με τη μελέτη	Αντικαταστήθηκαν με συμβατικές βρύσες/Μη ενεργή κατάσταση	Μη ορθή συμπεριφορά παιδιών/χρηστών/Μη ξεκάθαρη αρμοδιότητα
9.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
10.ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	Εν μέρει σύμφωνα με την μελέτη	Υπαρξη μοναδικού θερμοστάτη για όλο το κτίριο. Αλλαγή θέσης του σε σχέση με την αρχική. Ποικίλα θέματα με την θέρμανση των χώρων και την θερμική άνεση των χρηστών.	Ενδεομένως αστοχία της μελέτης.
11.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΥΦΟΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΔΙΠΛΟΥΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
12.ΠΡΟΣΒΕΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ:			
Αντλία θερμότητας στην αίθουσα εκδηλώσεων	Σύμφωνα με τη μελέτη	Μη ενεργή κατάσταση	Μη ξεκάθαρη αρμοδιότητα/μειωμένη θερμική άνεση
Κινητές μεταλλικές περαιότες αλουμινίου στην αίθουσα εκδηλώσεων	Δεν πραγματοποιήθηκαν	Τοποθέτηση εσωτερικών κουρτινών	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
Χρωματισμοί με οικολογικά χρώματα	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x

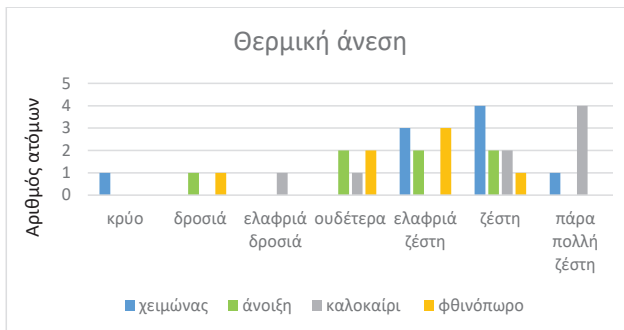
Πίνακας 3. Αποτελέσματα της επιτόπιας αυτοψίας/Συνεντεύξεων των ΚΑΠΗ.

ΚΥΡΙΑ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ/ΚΑΠΗ	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΙΑ / ΑΛΛΑΓΕΣ	ΛΟΓΟΙ ΑΙΤΙΟΛΟΓΙΑ/ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1.ΕΥΝΟΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΠΕΔΟ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
2.ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΧΩΡΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	Ο συγκεκριμένος προσανατολισμός δεν είναι ο πιο ευνοϊκός αλλά δεν υπάρχει δυνατότητα διαφορετικής τοποθέτησης στο οικοπέδο
3.ΦΥΤΕΜΕΝΟ ΔΩΜΑ(Στην άνοψη του κτιρίου, πάνω από την μεταλλική κατασκευή και πάνω από τα ξύλινα στεγαστρα.)	Σύμφωνα με τη μελέτη	Μη φροντισμένη φύτευση	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
4.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΙΓΚΟΛΑΣ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΟΝ ΟΥΧΗ	Κατασκευάσθηκε αλλά τη στιγμή της έρευνας ήταν χωρίς φύτευση	Ανευ προβλεπόμενης φύτευσης	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
5.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Φωτοκύτταρα τουαλέτες, boiler για ζεστό νερό)	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
6.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
7.ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	Χρήστες ικανοποιημένοι από το σύστημα θέρμανσης
8.ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΥΦΟΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΔΙΠΛΟΥΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
9.ΠΡΟΣΒΕΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Τοποθέτηση ξύλινων στεγαστρων στην ανατολική/δυτική όψη	Σύμφωνα με τη μελέτη	Ανευ προβλεπόμενης φύτευσης	Μη ολοκληρωμένη εφαρμογή της μελέτης
Ανεμοφράκτης στο 1 ^ο όροφο στην δευτερεύουσα είσοδο	Σύμφωνα με τη μελέτη	x	x
Δημιουργία ακάλυπτου χώρου στο όριο με το διπλανό κτίριο για την βελτίωση του φωτισμού	Σύμφωνα με τη μελέτη	Ο χώρος επιπλέον φυτευτηκε	x
Στη δυτική όψη μελετήθηκε μια μεταλλική αναρτήσιμη κατασκευή με ξύλινα σκάστρα και ημιδιαφανείς ορούμενες μεμβράνες σκασμού.	Δεν πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την μελέτη	Κατασκευή ξύλινης κατασκευής περισσότερο διακοσμητικού χαρακτήρα	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
13.ΑΛΛΑΓΕΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ	Στο ισόγειο αντί βιβλιοθήκης,χώροι γραφείων	x	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης
	Στο πρώτο ισόγειο αντί χώρου στάθμευσης,αίθρα και φυσιοθεραπευτήριο	Διασάρεσκια χρηστών ως προς τις συνθήκες άνεσης	Μη ορθή εφαρμογή της μελέτης

4.4. Ερωτηματολόγια

4.4.1. Σχολείο

Ως προς τη θερμική άνεση το σημαντικότερο εύρημα ήταν ότι η πλειοψηφία των ερωτηθέντων αισθάνεται πάρα πολλή ζέστη/ζέστη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και μόνο ένα 11% αισθάνεται ελαφριά δροσιά. Το φθινόπωρο αντίστοιχα, το 33% αισθάνεται ελαφρώς ζεστά ενώ το 22% ουδέτερα. Για το χειμώνα αντίστοιχα η πλειοψηφία των ερωτηθέντων αισθάνεται / ελαφρώς ζέστη. Τη άνοιξη υπάρχει ανισοκατανομή ως προς το ποσοστό που αισθάνεται ουδέτερα, ελαφρώς ζεστά και ζεστά.



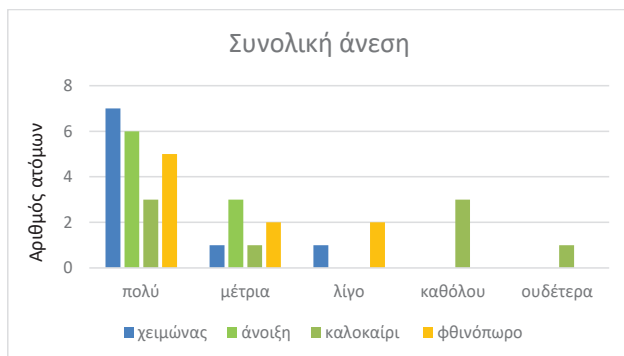
Διάγραμμα 1. Θερμική άνεση στο σχολικό κτίριο

Ως προς την ποιότητα του αέρα η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δηλώνει ότι η ποιότητα του αέρα είναι ουδέτερη κατά τη διάρκεια του έτους και μόνο το χειμώνα υπάρχει ένα 33% που δηλώνει πλήρη ικανοποίηση με την ποιότητα του αέρα. Σημαντικό εύρημα επίσης είναι ότι το ίδιο ποσοστό θεωρεί την ατμόσφαιρα αποπνικτική το καλοκαίρι.

Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων θεωρεί τα επίπεδα του φυσικού φωτισμού υψηλά καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ως προς τη θάμβωση υπάρχει μια ισοκατανομή απόψεων ως προς το εάν υπάρχει ή όχι.

Αντίστοιχα για τον τεχνητό φωτισμό, πάνω από το ένα δεύτερο των ερωτηθέντων δήλωσε ότι τα επίπεδα είναι υψηλά το χειμώνα, την άνοιξη και καλοκαίρι ενώ το φθινόπωρο ένας στους τρεις δήλωσε ότι τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού είναι κανονικά. Ως προς τη θάμβωση από το τεχνητό φωτισμό, οι ερωτηθέντες δηλώνουν ότι είναι ουδέτερα σε ποσοστό 33% το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο και σε ποσοστό 22% το καλοκαίρι. Ένας δήλωσε ότι υπάρχει θάμβωση το καλοκαίρι. Κανένας από τους ερωτηθέντες δεν δήλωσε ότι τα επίπεδα του τεχνητού φωτισμού είναι ανομοιόμορφα ή με διακυμάνσεις, ενώ η πλειοψηφία συμφώνησε ότι είναι ουδέτερη η κατανομή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Συνολικά, το 78% των ερωτηθέντων θεωρεί ότι οι συνθήκες είναι πολύ άνετες το χειμώνα, το 67% συμφωνεί για την άνοιξη και το 55% για το φθινόπωρο. Μόλις το 33% θεωρεί πολύ άνετες τις συνθήκες το καλοκαίρι, ενώ το ίδιο ποσοστό θεωρεί ότι οι συνθήκες δεν είναι καθόλου άνετες.



Διάγραμμα 2. Χαρακτηρισμός της συνολικής άνεσης στο σχολικό κτίριο

Ως προς τον έλεγχο των συνθηκών λιγότεροι από τους μισούς δήλωσαν ότι έχουν σε μεγάλο βαθμό τον έλεγχο της θερμοκρασίας το χειμώνα και την άνοιξη και ακόμη λιγότεροι για το καλοκαίρι και το

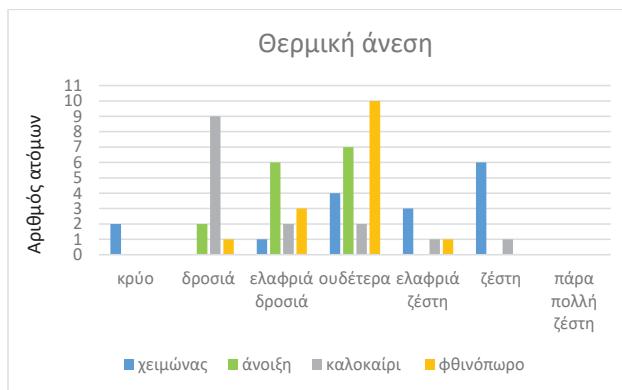
φθινόπωρο. Το ίδιο ποσοστό δήλωσε ότι δεν έχει καθόλου τον έλεγχο της θερμοκρασίας το χειμώνα και το καλοκαίρι. Πλήρης έλεγχος της θερμοκρασίας δεν δηλώθηκε από κανέναν ερωτηθέντα. Στα ίδια ποσοστά κυμάνθηκαν οι απαντήσεις ως προς τον έλεγχο του αερισμού. Μόλις το 11% δήλωσε ότι έχει πλήρως τον έλεγχο του αερισμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αναφορικά με τον θόρυβο η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δήλωσε ότι έχει σε μικρό βαθμό τον έλεγχο του θορύβου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ενώ για το φωτισμού η πλειοψηφία δήλωσε ότι έχει πλήρως τον έλεγχό του καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

4.4.2. ΚΑΠΗ

Ως προς την θερμική άνεση το 12,5% αισθάνεται κρύο τον χειμώνα ενώ το 38% και 25% αισθάνεται ζέστη -ή ουδέτερα αντίστοιχα ενώ το καλοκαίρι το 56% αισθάνεται δροσιά- ενώ το 6% αισθάνεται ελαφριά ζέστη και ζέστη. Την άνοιξη και φθινόπωρο το μεγαλύτερο ποσοστό αισθάνεται ουδέτερα ή ελαφριά δροσιά.

Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δήλωσε ότι η ποιότητα του αέρα είναι ουδέτερη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το καλοκαίρι υπάρχει ένα 31% που δήλωσε απαράδεκτη την ποιότητα του αέρα και μόλις το 12,5% θεωρεί πλήρως ικανοποιητική την ποιότητα του αέρα το καλοκαίρι. Το 31% αισθάνεται φρέσκο τον αέρα το καλοκαίρι, ενώ το 12,5% αισθάνεται αποπνικτική την ατμόσφαιρα την ίδια περίοδο στο υπόγειο και στους χώρους γραφείων.

Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων θεωρεί τα επίπεδα του φυσικού φωτισμού υψηλά καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου ενώ το 19% δήλωσε ότι τα επίπεδα είναι χαμηλά το χειμώνα και το φθινόπωρο. Κανείς από τους ερωτηθέντες δεν δήλωσε ότι υπάρχει θάμβωση. Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δήλωσε ότι τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού είναι υψηλά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ειδικά το καλοκαίρι. Συνολικά, το 68% των ερωτηθέντων θεωρεί ότι οι συνθήκες είναι πολύ άνετες το καλοκαίρι, το 75% συμφωνεί για την άνοιξη και το 62,5% για το φθινόπωρο. Ένας στους δύο θεωρεί πολύ άνετες τις συνθήκες το χειμώνα. Το 12,5% αισθάνεται λίγο άνετες τις συνθήκες το χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι, ποσοστό που αντιπροσωπεύει τους εργαζόμενους στους χώρους των γραφείων. Ως προς τον έλεγχο που έχουν οι χρήστες στο χώρο, η πλειοψηφία δήλωσε ότι έχει πλήρως τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε ποσοστά 63% για την άνοιξη και το φθινόπωρο, 56% το χειμώνα και 50% για το καλοκαίρι.



Διάγραμμα 3. Θερμική άνεση στο ΚΑΠΗ

Ως προς τον έλεγχο του αερισμού και τον έλεγχο του φωτισμού παραπάνω από τους μισούς ερωτηθέντες δήλωσαν ότι έχουν πλήρως τον έλεγχο. Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων δήλωσε ότι έχει πλήρως τον έλεγχο του θορύβου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους σε ποσοστό 50% το καλοκαίρι και το φθινόπωρο και 44% το χειμώνα και την άνοιξη.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας τα σημαντικότερα θέματα που προέκυψαν για το σχολικό κτίριο είναι τα εξής:

- Έλλειψη ενημέρωσης/εκπαίδευσης αναφορικά με την λειτουργία του κτιρίου και των συστημάτων του. Ύπαρξη ανενεργών συστημάτων καθώς και μη ξεκάθαρες δικαιοδοσίες στο πως πρέπει να λειτουργήσουν.
- Μη δυνατότητα ελέγχου του συστήματος της θέρμανσης.

- Μειωμένη θερμική άνεση τους καλοκαιρινούς μήνες.
- Απουσία φυσικού συστήματος ψύξης.
- Εκτεταμένη χρήση τεχνητού φωτισμού έναντι του φυσικού.
- Μη φροντισμένη φύτευση.
- Διαφορές σε σχέση με την μελέτη σχεδίασης.

Αντίστοιχα για το κτίριο ΚΑΠΗ είναι:

- Ανυπαρξία φυσικού συστήματος ψύξης.
- Εκτεταμένη χρήση τεχνητού φωτισμού έναντι του φυσικού.
- Μη φροντισμένη φύτευση.
- Διαφορές σε σχέση με την μελέτη σχεδίασης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα ΡΟΕ που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι μικρής έκτασης, παρόλα αυτά μπορούν να εξαχθούν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Προέκυψε ότι τα δυο κτίρια που μελετήθηκαν, πετυχαίνουν σε διαφορετικό βαθμό να ικανοποιήσουν τους χρήστες τους. Από την μια το κτίριο των ΚΑΠΗ παρόλο που δεν έχει την πληθώρα των βιοκλιματικών χαρακτηριστικών του σχολείου, φαίνεται να τους ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό (παρατηρώντας τα επίπεδα γενικής άνεσης και ιδιαίτερα κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι). Οι χρήστες των ΚΑΠΗ εμφανίζονται σίγουροι για το πώς λειτουργεί το κτίριό τους και νοιώθουν ότι έχουν τον έλεγχο των διαφόρων παραμέτρων άνεσης του κτιρίου. Από την άλλη, στο σχολικό κτίριο εμφανίζεται μια διαφορετική κατάσταση, καθώς, ενώ πρόκειται για ένα υπόδειγμα μελέτης βιοκλιματικού κτιρίου, οι χρήστες εκδήλωσαν μικρότερο βαθμό ικανοποίησης.

Το γεγονός ότι το σχολικό κτίριο παραδόθηκε χωρίς καμία περαιτέρω ενημέρωση ή εκπαίδευση φαίνεται ότι αποτελεί παράγοντα δυσaréσκειας που συντελεί και στην μη ορθή βιοκλιματική λειτουργία του. Έχει βρεθεί ότι μια τέτοια ενημέρωση και εκπαίδευση είναι απαραίτητη και επιθυμητή από τους χρήστες των βιοκλιματικών κτιρίων [9]. Από πλευράς του μελετητή είναι πολύ σημαντικό να υπάρξει κατανόηση των προσδοκιών και δυνατοτήτων του χρήστη, καθώς αυτό επηρεάζει και την επιτυχή λειτουργία του [10]. Αντίστοιχα παραδείγματα στο σχολείο είναι η τοποθέτηση αισθητήρων στις βρύσες και οι ανεμιστήρες οροφής. Ο μελετητής τοποθετώντας τα θεωρεί ότι συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην δημιουργία ενός πιο ευχάριστου περιβάλλοντος, ενώ αυτά αντιμετωπίζονται εντέλει με δυσaréσκεια και θεωρούνται μη πετυχημένες επιλογές. Ιδανικά θα ήταν προς όφελος της σωστής λειτουργίας του κτιρίου μια συνεχής επικοινωνία των μελετητών και χρηστών για να υπάρχει άμεση επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν, διαδικασία που θα λειτουργεί και ως ανατροφοδότηση για τον μελετητή. Επίσης είναι σημαντικό στα κτίρια με βιοκλιματικά χαρακτηριστικά η μελέτη να εφαρμόζεται πιστά και αν προκύψουν αλλαγές και επιβάλλονται παρεμβάσεις αυτές να γίνονται σε συνεννόηση με τους μελετητές.

Το δεύτερο θέμα που προέκυψε από την σύγκριση των δυο κτιρίων είναι η δυνατότητα που παρέχεται στους χρήστες, να ελέγχουν τα συστήματα που σχετίζονται με τους παράγοντες άνεσης. Στη παρούσα έρευνα οι χρήστες του σχολείου έδειξαν να δυσφορούν με την αδυναμία ελέγχου των συστημάτων που σχετίζονται με τις παραμέτρους άνεσης, και κυρίως της θέρμανσης, η οποία θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη ενός άνετου περιβάλλοντος [11]. Οι χρήστες θέλουν συστήματα που να είναι απλά στη χρήση και να αφήνουν ένα βαθμό ελευθερίας, καθώς τα σύνθετα και πολύπλοκα στη χρήση συστήματα, δεν θα λειτουργήσουν σε ικανοποιητικό βαθμό [12].

Ένα άλλο θέμα που αναδόθηκε από τη μελέτη ΡΟΕ, είναι η εκτεταμένη χρήση τεχνητού φωτισμού. Παρατηρήθηκε ότι και στις δυο περιπτώσεις κτιρίων ενώ υπάρχει επάρκεια φυσικού φωτισμού σε αρκετά μεγάλο βαθμό (γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις απαντήσεις των ερωτηματολογίων) προτιμάται η σχεδόν συνεχής λειτουργία του τεχνητού φωτισμού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα και την μικρή αύξηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων και κατά συνέπεια της θερμοκρασίας μέσα στο χώρο αλλά και των αυξημένων καταναλώσεων ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος, ένα άλλο σημείο κοινό στα δυο κτίρια, είναι η ανυπαρξία ενός φυσικού συστήματος ψύξης το οποίο θα βοηθούσε στο δροσίμο των κτιρίων.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα εργασία είναι ότι τα βιοκλιματικά κτίρια δεν λειτουργούν πάντα όπως σχεδιάστηκαν και οι λόγοι σχετίζονται και με το πως βλέπουν και ζουν οι χρήστες το κτίριο. Αυτό αντανακλάται και στην συμπεριφορά τους με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η απόδοση του κτιρίου. Οι μελέτες POE μπορούν να καλύψουν αυτό το κενό και να δώσουν την δυνατότητα για βελτιωτικές δράσεις που θα αυξήσουν την απόδοση του κτιρίου αλλά και την ικανοποίηση των χρηστών του. Αυτό είναι και κατά βάση το συμπέρασμα που προέκυψε από την μελέτη PROBE. Τα άνετα για το χρήστη κτίρια είναι και ενεργειακά αποδοτικά. Η ικανοποίηση των χρηστών, η αειφορική διαχείριση και η επίτευξη οικονομικής απόδοσης προκύπτουν να είναι τρεις αλληλένδετες έννοιες που συμβάλουν στην συνεχή βελτίωση της λειτουργίας του κτιρίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Riley, M., Moody, C. & Pitt M., 2009, "A Review of the Evolution of Post-Occupancy Evaluation as a Viable Performance Measurement Tool" in the Proceedings of the 4th Annual Conference Liverpool on the Built Environment and Natural Environment.
http://www.ljmu.ac.uk/BLT/BUE_Docs/BEAN_Conference_2009_GH.pdf
- [2] Preiser, W., 2002, "The evolution of post-occupancy evaluation: toward building performance and universal design evaluation" in Federal Facilities Council Technical Report No. 145 LEARNING FROM OUR BUILDINGS A State-of-the-Practice Summary of Post-Occupancy Evaluation, 9-22, Washington: NATIONAL ACADEMY PRESS
- [3] Zimmerman, A. and Martin, A., 2001, "Post Occupancy evaluation: benefits and barriers" Building Research & Information, 29:2, pp168-174.
- [4] Meir, I., A., Garb, Y., Jiao D., and Cicelsky A., 2009, "Post-Occupancy Evaluation: An Inevitable Step Toward Sustainability" in M. Santamouris (eds.) Advances in building Energy Research, 189-220, London :Earthscan.
- [5] Pfafferott, J., Herkel, S., Kalz, D. and Zeuschner, A., 2007, "Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria", Energy and Buildings, 39:7, pp750-757.
- [6] Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, T. and Leonhart, R., 2007, "Thermal comfort and workplace occupant satisfaction: Results of field studies in German low energy office buildings", Energy and Buildings 39:7, pp758-769.
- [7] Cohen, R., Standeven, M., Bordass, B. & Leaman, A., 2001, "Assessing building performance in use 1: the Probe process", Building Research & Information, 29:2, 85-102.
- [8] Cooper Acheson, B., Ahrentzen, S. and Hasselkus Risteen, B., 1991, "Post-occupancy evaluation: An environment-behaviour technique for assessing the built environment", Canadian Journal of Occupational Therapy, 58:4, pp181-188.
- [9] Brown, Z. and Cole, R., 2009, "Influence of occupants' knowledge on comfort expectations and behaviour", Building Research & Information, 37:3, pp.227-245.
- [10] Zhang, Y. and Barrett, P. 2010, "Findings from a post-occupancy evaluation in the UK primary schools sector", Facilities, 28:13/14 , pp.641 – 656.
- [11] Frontczak, M. and Wargocki, P., 2011, "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments", Building and environment, 46:4, pp.922-937.
- [12] Bordass, B., Leaman, A. and Bunn, R., 2007, Controls for End Users: A Guide for Good Design and Implementation, Building Controls Industry Association, Harlow.

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΒΗΤΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ

Κ.Τ. Παπακώστας*, Φ. Πίτσαβου

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ,
*e-mail: dinpap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το 2008, μετά το πρωτόκολλο του Κιότο του 1997, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και επέβαλε την εφαρμογή μέτρων (στόχος 20-20-20) με σκοπό την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος, την εξοικονόμηση ενέργειας και την μετατροπή της σε μια ιδιαίτερα αποδοτική από ενεργειακή άποψη οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Από το Σεπτέμβριο του 2015 εφαρμόζεται υποχρεωτικά η οδηγία ErP (Energy related Products) για τον οικολογικό σχεδιασμό και την ενεργειακή σήμανση των συσκευών που καταναλώνουν ενέργεια. Μια από τις επιπτώσεις της Οδηγίας αυτής είναι η βαθμιαία κατάργηση των κλασικών συστημάτων θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών και η αντικατάστασή τους με συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών. Σύμφωνα με την οδηγία ErP, οι νέοι λέβητες θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον την απόδοση των λεβήτων συμπύκνωσης και η εγκατάσταση ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κυκλοφορητών μεταβλητών στροφών στα συστήματα θέρμανσης καθίσταται υποχρεωτική.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη από την αντικατάσταση ενός συμβατικού συστήματος κεντρικής θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών, με λέβητα πετρελαίου και κυκλοφορητή σταθερών στροφών, με ένα σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών με λέβητα συμπύκνωσης και κυκλοφορητή μεταβλητών στροφών, σε ένα κτίριο κατοικιών. Οι περιπτώσεις μελέτης διακρίνονται με βάση τη θερμομόνωση του κτιρίου και είναι: α) κτίριο χωρίς θερμομόνωση β) κτίριο που υπάγεται στον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (Κ.Θ.Κ.) του 1979 και γ) κτίριο που υπάγεται στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.). Για κάθε περίπτωση, και για τις πόλεις Αθήνα και Θεσσαλονίκη, εξετάζεται η αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος χαμηλών θερμοκρασιών, με ή χωρίς την αναβάθμιση της θερμικής προστασίας του κτιρίου σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. Υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες του κτιρίου, γίνεται η διαστασιολόγηση του συστήματος θέρμανσης με επιλογή συσκευών και θερμαντικών σωμάτων, εκτιμάται η ενεργειακή κατανάλωση (θερμική και ηλεκτρική) με προσομοίωση του συστήματος σύμφωνα με την μέθοδο συχνοτήτων θερμοκρασιών (Bin method), υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας, το κόστος αντικατάστασης του συστήματος θέρμανσης καθώς και η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης (χωρίς να ληφθεί υπόψη το κόστος της θερμομόνωσης από την μετάβαση από τις περιπτώσεις α και β στην γ). Η ετήσια μείωση στην κατανάλωση θερμικής ενέργειας με την εγκατάσταση συστήματος χαμηλών θερμοκρασιών, χωρίς αναβάθμιση της θερμικής μόνωσης, είναι 26% για την Αθήνα και 29% για τη Θεσσαλονίκη. Στις περιπτώσεις που το κτίριο μονώνεται θερμικά σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας κυμαίνεται από 40% για κτίριο κατά Κ.Θ.Κ. έως 84% για κτίριο χωρίς θερμική μόνωση. Η χρήση ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κυκλοφορητή μεταβλητής ταχύτητας οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας που υπερβαίνει το 87% σε όλες τις περιπτώσεις. Τα οικονομικά οφέλη από την αντικατάσταση επίσης είναι σημαντικά καθώς η εξοικονόμηση κόστους καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας (με τιμές 2016) είναι πάνω από 37% για την Αθήνα και 51% για τη Θεσσαλονίκη, σε κάθε περίπτωση μελέτης. Η περίοδος απόσβεσης κυμαίνεται από 3 έως 10 έτη ανάλογα με την περίπτωση.

Λέξεις Κλειδιά: συστήματα θέρμανσης, λέβητες συμπύκνωσης, κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών, εξοικονόμηση ενέργειας, περίοδος αποπληρωμής

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία 50 χρόνια ως αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης και της πληθυσμιακής αύξησης. Η χρήση ενέργειας στα κτίρια αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα τόσο της παγκόσμιας και όσο της εθνικής ζήτησης ενέργειας. Το 2010 ο κτιριακός τομέας αντιπροσώπευε σχεδόν το 32% της παγκόσμιας τελικής ζήτησης ενέργειας (24% για τις κατοικίες και 8% για τις εμπορικές) και το 30% των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με τη χρήση ενέργειας [1]. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), το 2012 τα κτίρια αντιπροσώπευαν περίπου το 40% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας, το 55% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και σχεδόν το 36% των συνολικών εκπομπών CO₂ [2]. Τα κτίρια είναι ο μεγαλύτερος τομέας τελικής χρήσης ενέργειας, ακολουθούμενη από τις μεταφορές (32%), τη βιομηχανία (26%) και τη γεωργία (2%). Το έτος 2013, η θέρμανση χώρων στην ΕΕ-28 αντιπροσώπευε το 69% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης σε κατοικίες, ακολουθούμενη από τη θέρμανση νερού χρήσης στο 11% [3]. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, ο οικιακός τομέας το 2015 ήταν υπεύθυνος για το 26.6% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας [4].

Είναι προφανές ότι η ενέργεια που χρησιμοποιείται στα κτίρια κυριαρχεί σε σχέση με όλους τους άλλους τομείς τελικής χρήσης. Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, εξαιρισμό και ψύξη στον κτιριακό τομέα, και παρελκόμενα οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, διαρκώς αυξάνονται λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης καθώς και της διεύρυνσης του χρόνου παραμονής των ανθρώπων σε κλειστούς χώρους. Αυτή η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ στο κτιριακό περιβάλλον ανάγκασε τις περισσότερες χώρες να θέσουν ως προτεραιότητα στην ενεργειακή τους πολιτική την εξοικονόμηση ενέργειας και να προωθήσουν στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης. Νέα πρότυπα κατασκευής, νέοι κανονισμοί, τεχνικές οδηγίες και νομοθεσίες, καθώς και νέες ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες υιοθετούνται προκειμένου να προωθηθεί ο σχεδιασμός χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και η αειφορία στα κτίρια. Το 2009, μετά το πρωτόκολλο του Κιότο του 1997, η ΕΕ δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και επέβαλε την εφαρμογή των στόχων 2020 για την κλιματική αλλαγή και την ενέργεια που είναι γνωστοί ως στόχοι 20-20-20. Οι τρεις στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν έως το 2020 είναι i) η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, ii) η αύξηση στο 20% του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας και iii) η μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, εκδόθηκε μια σειρά οδηγιών και εκτελεστικών κανονισμών από την ΕΕ, με άμεση εφαρμογή σε όλα τα κράτη μέλη της.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση χώρων καθώς και για τη θέρμανση νερού χρήσης αντιπροσωπεύει σημαντικό μερίδιο της συνολικής ενεργειακής ζήτησης, η ΕΕ θέσπισε τον Σεπτέμβριο του 2015 την οδηγία Energy-related Products (ErP) με στόχο την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας από τη θέρμανση χώρων και νερού περίπου 1900 PJ έως το 2020, που αντιστοιχεί σε περίπου 110 Mt εκπομπών CO₂ (σε σύγκριση με το τι θα συμβεί αν δεν ληφθούν μέτρα). Σύμφωνα με την οδηγία αυτή, όλες οι συσκευές για τη θέρμανση χώρων, παρασκευής καθώς και αποθήκευσης θερμού νερού χρήσης, καθώς και τα συστήματα που περιλαμβάνουν συσκευές αυτού του τύπου, πρέπει να πληρούν ορισμένα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης που καθορίζονται από την ΕΕ και να οδηγούν στους στόχους 20-20-20. Η οδηγία ErP αποτελείται από δύο σημαντικά μέρη: 1) την οδηγία οικολογικού σχεδιασμού [5] και τους κανονισμούς της Επιτροπής 813/2013 [6] και 814/2013 [7], οι οποίοι ορίζουν ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης καθώς και περιβαλλοντικές απαιτήσεις για θερμαντήρες νερού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, αντλίες θερμότητας και λέβητες με ονομαστική θερμική ισχύ ≤ 400 kW και 2) την οδηγία για την ενεργειακή επισήμανση [8] και τους κανονισμούς της Επιτροπής 811/2013 [9] και 812/2013 [10], οι οποίοι επιβάλλουν υποχρεωτική ταξινόμηση κάθε προϊόντος που συνδέεται με την ενέργεια, από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας, του επιπέδου θορύβου και άλλων ειδικών πληροφοριών. Όλα τα προϊόντα πρέπει να ταξινομηθούν από το A (υψηλότερη απόδοση) έως το G (χαμηλότερη απόδοση). Ωστόσο, υπάρχουν πρόσθετες κατηγορίες (A+, A++ και A+++) οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για προϊόντα υψηλής απόδοσης όπως αντλίες θερμότητας.

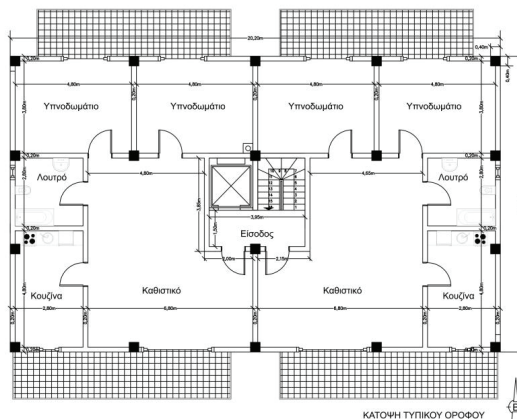
Με την επιβολή περιορισμών στην κατανάλωση ενέργειας των συνδεόμενων με την ενέργεια προϊόντων, η οδηγία ErP παροτρύνει τους κατασκευαστές να κατασκευάσουν προϊόντα πιο αποδοτικά, τα οποία θα απαιτούν και λιγότερη ενέργεια για τη λειτουργία τους. Επιπλέον, η οδηγία αποκλείει από την αγορά της ΕΕ όλα τα προϊόντα χαμηλής απόδοσης που δεν διαθέτουν την

απαραίτητη ενεργειακή σήμανση και δεν πληρούν τις απαιτήσεις της οδηγίας για τον οικολογικό σχεδιασμό. Σύμφωνα με την οδηγία ErP όλοι οι συμβατικοί λέβητες χαμηλής απόδοσης πρέπει να αντικαθίστανται σταδιακά με λέβητες συμπύκνωσης ή με αντλίες θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι από τον Σεπτέμβριο του 2015 απαγορεύεται η είσοδος συμβατικών λεβήτων στην αγορά της ΕΕ καθώς και η τοποθέτησή τους σε εγκαταστάσεις θέρμανσης. Οι ήδη εγκατεστημένοι θα συνεχίσουν να λειτουργούν μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής τους. Επίσης, η χρήση κυκλοφορητών ενεργειακής κατηγορίας "Α" και δείκτη ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency Index) $EI \leq 0.23$ καθίσταται υποχρεωτική [12].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει και να παρουσιάσει τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη από την αντικατάσταση ενός συμβατικού συστήματος κεντρικής θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών, με λέβητα πετρελαίου και κυκλοφορητή σταθερών στροφών, με ένα σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών με λέβητα συμπύκνωσης καύσης φυσικού αερίου και κυκλοφορητή μεταβλητών στροφών, σε ένα κτίριο κατοικιών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται πέντε διαφορετικές περιπτώσεις αναβάθμισης κτιρίου κατοικιών και του συστήματος θέρμανσής του στις κλιματικές συνθήκες της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Για κάθε περίπτωση διαστασιολογείται το σύστημα θέρμανσης και γίνεται εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον αντίστοιχο λέβητα (συμβατικό ή συμπύκνωσης) σύμφωνα με τη μέθοδο συχνοτήτων θερμοκρασιών (Bin Method). Επίσης, σε κάθε περίπτωση μελέτης υπολογίζεται και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον αντίστοιχο κυκλοφορητή θερμού νερού (σταθερών στροφών ή ηλεκτρονικά ελεγχόμενο μεταβλητών στροφών). Στη συνέχεια, γίνεται η οικονομική ανάλυση των περιπτώσεων αναβάθμισης του συστήματος θέρμανσης. Υπολογίζεται αρχικά το κόστος που απαιτείται για την αντικατάσταση του συστήματος ανά περίπτωση μελέτης και τελικά το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και η περίοδος απόσβεσης της αρχικής επένδυσης.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το κτίριο κατοικιών είναι μια τριώροφη πολυκατοικία η οποία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να προσομοιάζει σε μία τυπική πολυκατοικία στην Ελλάδα. Η πολυκατοικία έχει συνολικά 6 διαμερίσματα (2 ανά τυπικό όροφο) καθαρού εμβαδού 103 m², επίπεδη οροφή μορφής δώματος και θεωρείται ότι θερμαίνεται πλήρως στους κατοικήσιμους χώρους. Στην Εικ. 1 δίδεται η κάτοψη του τυπικού ορόφου με τις διαστάσεις των χώρων και των δομικών στοιχείων. Το κτίριο μελετάται για τις κλιματικές συνθήκες των δύο μεγαλύτερων πόλεων στην Ελλάδα, της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, και για τρεις περιπτώσεις θερμικής μόνωσης: α) χωρίς θερμομόνωση (Χ.Θ.) β) σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (Κ.Θ.Κ.) του 1979 και γ) σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.). Τα κατασκευαστικά δεδομένα του κτιρίου και οι συντελεστές θερμοπερατότητας των δομικών του στοιχείων για τις 3 περιπτώσεις δίνονται αναλυτικά στη [13]. Επίσης τα συστήματα θέρμανσης που μελετήθηκαν είναι: i) σύστημα με λέβητα πετρελαίου θερμού νερού και θερμοκρασίες λειτουργίας προσαγωγής/επιστροφής νερού 90°/70°C και ii) σύστημα με λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου (Φ.Α.) και θερμοκρασίες λειτουργίας προσαγωγής/επιστροφής νερού 50°/40°C.



Εικόνα 1: Κάτοψη τυπικού ορόφου του υπό μελέτη κτιρίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης της εγκατάστασης θέρμανσης της τριώροφης πολυκατοικίας σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη είναι οι εξής:

- κτίριο Χ.Θ –κεντρική θέρμανση με κοινό λέβητα πετρελαίου, θερμοκρασιών νερού 90°/70°C
- κτίριο Κ.Θ.Κ. – κεντρική θέρμανση με κοινό λέβητα πετρελαίου, θερμοκρασιών νερού 90°/70°C
- κτίριο Κ.Θ.Κ. – κεντρική θέρμανση με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α., θερμοκρασιών νερού 50°/40°C
- κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. – κεντρική θέρμανση με κοινό λέβητα πετρελαίου, θερμοκρασιών νερού 90°/70°C
- κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. – κεντρική θέρμανση με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α., θερμοκρασιών νερού 50°/40°C

2.1. Διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης

Η διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών του κτιρίου, την επιλογή των θερμαντικών σωμάτων, του λέβητα και του καυστήρα, την χάραξη του δικτύου σωληνώσεων, την επιλογή των συσκευών ασφαλείας και ρύθμισης του συστήματος (δοχείο διαστολής, βαλβίδα ασφαλείας, διόδες/τρίοδες βαλβίδες, θερμοστατικές βαλβίδες κ.λ.π.), τον υπολογισμό της στατικής πίεσης του νερού στο δίκτυο και την επιλογή του κυκλοφορητή θερμού νερού. Η διαστασιολόγηση του συστήματος και ο υπολογισμός και επιλογή των συσκευών έγινε για κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις μελέτης.

2.1.1. Υπολογισμός θερμικών απωλειών, επιλογή λεβήτων – θερμαντικών σωμάτων

Οι θερμικές απώλειες του κτιρίου υπολογίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12831για κάθε περίπτωση θερμικής μόνωσης και για τις δύο πόλεις [13]. Τα θερμαντικά σώματα επιλέχθηκαν για θερμοκρασίες προσαγωγής/επιστροφής/χώρου 90°/70°/20°Cστα συστήματα με λέβητα καύσης πετρελαίου, και για θερμοκρασίες 50°/40°/20°C στα συστήματα με λέβητα συμπύκνωσης καύσης Φ.Α. Η επιλογή των λεβήτων έγινε από καταλόγους εταιρειών εμπορίας λεβήτων της ελληνικής αγοράς, με βάση τα συνολικά θερμικά φορτία σχεδιασμού προσαυξημένα κατά 10%. Ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών του κτιρίου H_B , τα θερμικά φορτία σχεδιασμού $\Phi_{HL,B}$, η θερμική ισχύς των λεβήτων Q_K , η τυποποιημένη θερμική ισχύς Q_K' και ο βαθμός απόδοσης η από τους καταλόγους κατασκευαστών για τις περιπτώσεις μελέτης της εγκατάστασης θέρμανσης δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Θερμικά φορτία, θερμική ισχύς λεβήτων και βαθμός απόδοσης ανά περίπτωση μελέτης

Αθήνα					Θεσσαλονίκη				
Χωρίς Θερμομόνωση– Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου									
H_B	$\Phi_{HL,B}$	Q_K	Q_K'	η	H_B	$\Phi_{HL,B}$	Q_K	Q_K'	η
[W/K]	[W]	[W]	[kW]	[%]	[W/K]	[W]	[W]	[kW]	[%]
2997.1	56682	62350	63	91.5	2997.1	73253	80578	98	92.1
Κ.Θ.Κ.– Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου									
1276.6	26292	28922	29	93.1	1203.9	33507	36858	40.7	93.2
Κ.Εν.Α.Κ.– Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου									
1091.2	23026	25328	29	93.1	1030.9	29683	32652	40.7	93.2
Κ.Θ.Κ.– Λέβητας συμπύκνωσης καύσης Φ.Α.									
1276.6	26292	28922	36.6	108	1203.9	33507	36858	39	107.7
Κ.Εν.Α.Κ.– Λέβητας συμπύκνωσης καύσης Φ.Α.									
1091.2	23026	25328	27.5	108	1030.9	29683	32652	36.6	108

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών, εξετάζονται οι περιπτώσεις μετάβασης από συστήματα υψηλών θερμοκρασιών σε συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών, με ή χωρίς τη θερμική αναβάθμιση του κτιρίου. Οι περιπτώσεις αυτές είναι:

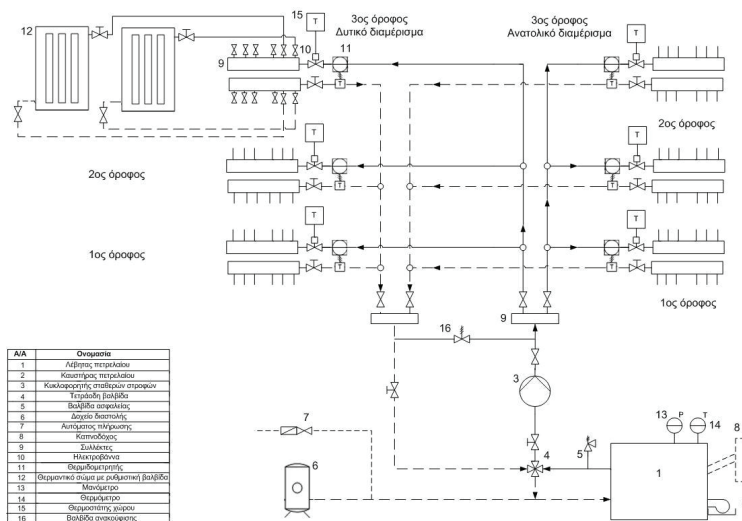
- Κτίριο Χ.Θ. με κοινό λέβητα πετρελαίου σε κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α.
- Κτίριο Κ.Θ.Κ. με κοινό λέβητα πετρελαίου σε κτίριο Κ.Θ.Κ. με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α.
- Κτίριο Κ.Θ.Κ. με κοινό λέβητα πετρελαίου σε κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α.
- Κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. με κοινό λέβητα πετρελαίου σε κτίριο Κ.Εν.Α.Κ. με λέβητα συμπύκνωσης Φ.Α.

Εξετάζοντας τα θερμαντικά σώματα σε κάθε περίπτωση, διαπιστώνεται ότι περνώντας από τις υψηλές θερμοκρασίες νερού (90°/70°) στις χαμηλές (50°/40°), μολονότι αναβαθμίζεται το κτίριο ως προς τη

θερμική του προστασία, τα υπάρχοντα θερμαντικά σώματα στην πλειονότητα τους δεν επαρκούν για να καλύψουν τα θερμικά φορτία και χρειάζονται αντικατάσταση με σώματα μεγαλύτερης επιφάνειας. Εξάιρεση αποτελεί μόνο η περίπτωση (Α), στην οποία κάποια θερμαντικά σώματα δεν απαιτείται να αντικατασταθούν.

2.1.2. Υπολογισμός πώσης πίεσης νερού, επιλογή κυκλοφορητών

Στην Εικ. 2 απεικονίζεται το κατακόρυφο λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών με κοινό λέβητα καύσης πετρελαίου.



Εικόνα 2: Κατακόρυφο λειτουργικό διάγραμμα σε σύστημα θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών

Το σύστημα είναι κεντρικό, δισωλήνιο, με αυτονομία σε κάθε διαμέρισμα. Δύο κατακόρυφοι χαλυβδοσωλήνες τροφοδοτούν με θερμό νερό τους συλλέκτες προσαγωγής κάθε διαμερίσματος, από όπου ξεκινούν πλαστικοί σωλήνες για κάθε θερμαντικό σώμα. Οι αντίστοιχοι σωλήνες επιστροφής επιστρέφουν το νερό στους συλλέκτες επιστροφής και στο λέβητα. Στην σωλήνωση τροφοδοσίας κάθε διαμερίσματος τοποθετείται δίοδη βαλβίδα με θερμοστάτη και θερμοδομετρητή ενώ κεντρικά, μετά τον λέβητα, τοποθετείται τετράοδη βάννα ανάμιξης. Ο κυκλοφορητής νερού είναι σταθερών στροφών.

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κυκλοφορητών θερμού νερού ανά περίπτωση μελέτης

Αθήνα				Θεσσαλονίκη			
Χωρίς Θερμομόνωση – Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου							
V	H	Στροφές	P ₁	V	H	Στροφές	P ₁
[m ³ /h]	[m]	[rpm]	[W]	[m ³ /h]	[m]	[rpm]	[W]
2.71	2.14	2190	100	4.22	2.9	2500	205
Κ.Θ.Κ. – Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου							
1.25	0.96	1890	75	1.75	0.92	1650	125
Κ.Εν.Α.Κ. – Κοινός λέβητας καύσης πετρελαίου							
1.25	0.96	1890	75	1.75	0.92	1650	125
Κ.Θ.Κ. – Λέβητας συμπύκνωσης καύσης Φ.Α.							
3.15	1.74	1200+4230	3+40	3.36	2.5	1200+3700	7+120
Κ.Εν.Α.Κ. – Λέβητας συμπύκνωσης καύσης Φ.Α.							
2.37	1.43	1200+4230	3+40	3.15	1.84	1200+3700	7+120

Η φιλοσοφία σχεδιασμού του συστήματος χαμηλών θερμοκρασιών είναι αντίστοιχη, χωρίς τετράοδη βάννα ανάμιξης, ο κυκλοφορητής είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενος μεταβλητών στροφών ενώ σε κάθε θερμαντικό σώμα τοποθετείται θερμοστατική βαλβίδα. Η διαστασιολόγηση των δικτύων σωληνώσεων για κάθε μία από τις πέντε περιπτώσεις μελέτης καθώς και ο υπολογισμός και η επιλογή όλων των συσκευών δίνονται αναλυτικά στην [14]. Στον Πίνακα 2 δίνονται όλα τα στοιχεία υπολογισμού για την επιλογή των κατάλληλων κυκλοφορητών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους ανά περίπτωση μελέτης (παροχή V , μανομετρικό ύψος H , στροφές και ηλεκτρική ισχύς κινητήρα P_1).

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η κατανάλωση ενέργειας των συσκευών του συστήματος θέρμανσης ανά περίπτωση μελέτης υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο συχνοτήτων θερμοκρασιών (Bin Method) [15]. Η μέθοδος συνίσταται στον υπολογισμό του θερμικού ή ηλεκτρικού φορτίου σε διάφορες θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα και στον πολλαπλασιασμό των φορτίων που προκύπτουν με τον αριθμό των ωρών στις οποίες εμφανίζεται το θερμοκρασιακό διάστημα που περιέχει τις θερμοκρασίες αυτές. Το θερμοκρασιακό διάστημα αυτό ονομάζεται *bin* διάστημα. Ως πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής θεωρείται το ότι λαμβάνει υπόψη της τη μεταβολή του βαθμού απόδοσης των συσκευών σε διάφορες θερμοκρασίες ή σε μερικό φορτίο. Σύμφωνα με τη μέθοδο, οι θερμικές απαιτήσεις ενός κτιρίου θεωρούνται γραμμική συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας. Οι εσωτερικές θερμικές πηγές ενέργειας λαμβάνονται υπόψη θεωρώντας ως εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου τη θερμοκρασία ισορροπίας θ_{bal} , δηλαδή τη θερμοκρασία εκείνη του εξωτερικού περιβάλλοντος στην οποία το κτίριο δεν χρειάζεται ούτε ψύξη ούτε θέρμανση.

3.1. Διαδικασία υπολογισμών

Τα απαραίτητα θερμοκρασιακά δεδομένα (Bindata) για τις δύο πόλεις ελήφθησαν από την [16]. Για κάθε θερμοκρασιακό διάστημα γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση $Q_{build}(\theta_j)$ σε [Wh]. Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{build}(\theta_j) = H_B \cdot DT(\theta_j) \cdot n_j \quad (1)$$

όπου, θ_j είναι η μέση τιμή του κάθε θερμοκρασιακού διαστήματος σε [°C], H_B ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών του κτιρίου σε [W/K], $DT(\theta_j)$ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας ισορροπίας του κτιρίου και της μέσης θερμοκρασίας του bin διαστήματος ($\theta_{bal} - \theta_j$) σε [K], και n_j συχνότητα εμφάνισης του κάθε θερμοκρασιακού διαστήματος σε [h].

Η θερμοκρασία ισορροπίας του κτιρίου θ_{bal} ορίζεται ως η θερμοκρασία εκείνη του εξωτερικού περιβάλλοντος σε [°C] στην οποία, για δεδομένη εσωτερική θερμοκρασία κτιρίου θ_{int} , οι συνολικές θερμικές απώλειες του κτιρίου ισούνται με τα θερμικά του κέρδη.

$$\theta_{bal} = \theta_{int} - \frac{Q_{gain}}{H_B} \quad (2)$$

όπου, θ_{int} η ισοσταθμισμένη εσωτερική θερμοκρασία [°C] του κτιρίου για όλο το 24ωρο, σε περίπτωση που ο θερμοστάτης ρυθμίζεται σε διαφορετικές θερμοκρασίες στις διάφορες ώρες της ημέρας, και Q_{gain} τα συνολικά θερμικά κέρδη του κτιρίου σε [W] σύμφωνα με την [17].

Η θερμοκρασία ισορροπίας κυμαίνεται από 17.6÷17.8°C για κτίριο Χ.Θ., από 15.3÷15.7°C για κτίριο Κ.Θ.Κ. και από 14.6÷15.1°C για κτίριο Κ.Εν.Α.Κ., ανάλογα με την πόλη και τον μήνα υπολογισμού. Δηλαδή, όσο αναβαθμίζεται η θερμική προστασία του κτιρίου αυξάνεται η θερμοχωρητικότητά του και απαιτεί θέρμανση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αναλυτικοί υπολογισμοί δίδονται στην [14].

Επειδή η απόδοση των λεβητών εξαρτάται από τη θερμική φόρτιση του λέβητα (λόγος θερμικού φορτίου προς την ονομαστική ισχύ) απαιτείται και ο υπολογισμός του μερικού φορτίου του κτιρίου σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα.

Το θερμικό φορτίο του κτιρίου σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα $\Phi_{HL,j}$ σε [W] δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_{HL,j} = H_B \cdot (\theta_{int} - \theta_j) \quad (3)$$

ενώ το μερικό θερμικό φορτίο $\Phi'_{HL,j}$ [%] σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα είναι:

$$\Phi'_{HL,j} = \frac{100 \cdot \Phi_{HL,j}}{\Phi_{HL,B}} \quad (4)$$

Η κατανάλωση καυσίμου FC σε [l πετρελαίου] για τον κοινό λέβητα ή σε [m³ φυσικού αερίου] για το λέβητα συμπύκνωσης δίνεται σε κάθε περίπτωση από τη σχέση:

$$FC(\theta_j) = \frac{Q_{\text{load}}(\theta_j)}{1000 \cdot H_o \cdot \eta_{\text{total}}} \quad (5)$$

όπου, H_o θερμικός δύναμη του καυσίμου σε [kWh/l]για το πετρέλαιο και σε [kWh/m³] για το φυσικό αέριο, και η_{total} συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης.

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{λεβ}} \cdot \eta_{\delta.δ.} \cdot \eta_{em,T} \quad (6)$$

όπου, $\eta_{\text{λεβ}}$ ο βαθμός απόδοσης του λέβητα (σε σχέση με το μερικό φορτίο), $\eta_{\delta.δ.}$ ο βαθμός απόδοσης του δικτύου διανομής θερμού νερού και $\eta_{em,T}$ ο βαθμός απόδοσης των θερμαντικών τερματικών μονάδων, σύμφωνα με την [17].

3.2. Κατανάλωση καυσίμου και ηλεκτρικού ρεύματος - κόστος λειτουργίας

Εφαρμόζοντας την υπολογιστική διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης της εγκατάστασης θέρμανσης της τριώροφης πολυκατοικίας σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη, υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις Qστο λέβητα (ενεργειακές απαιτήσεις κτιρίου προς το βαθμό απόδοσης του συστήματος), η κατανάλωση καυσίμου FCκαι το κόστος του καυσίμου ανά περίπτωση. Η ενεργειακή ανάλυση έγινε και χωρίς τη συνεισφορά των θερμικών κερδών στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου, δηλαδή με βάση την ισοσταθμισμένη εσωτερική θερμοκρασία θ_{int} . Στην περίπτωση αυτή το σύστημα θέρμανσης καλείται να λειτουργήσει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα γιατί η θέρμανση του κτιρίου αρχίζει σε υψηλότερη εξωτερική θερμοκρασία, εφόσον $\theta_{\text{int}} > \theta_{\text{bal}}$. Επειδή ο υπολογισμός της θερμοκρασίας ισορροπίας θ_{bal} γίνεται πάντοτε με κάποιες παραδοχές για την παρουσία των ανθρώπων στο κτίριο, τη χρήση συσκευών και φώτων και τη συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμικό ισοζύγιο, οι οποίες πάντοτε ενέχουν κάποια αβεβαιότητα, θεωρήθηκε ότι πρέπει να εξετασθούν και οι δύο περιπτώσεις ενεργειακής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3 και για τις δύο περιπτώσεις (σε παρένθεση δίνονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης χωρίς θερμικά κέρδη)

Πίνακας 3: Ενεργειακές απαιτήσεις [MWh], κατανάλωση [l ή m³] και κόστος καυσίμων [€] σε όλη τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης ανά περίπτωση μελέτης για Αθήνα και Θεσσαλονίκη

	X.Θ.	Κ.Θ.Κ.		Κ.Εν.Α.Κ.	
	Αθήνα				
	Κοινός λέβητας	Κοινός λέβητας	Λέβητας συμπύκνωσης	Κοινός λέβητας	Λέβητας συμπύκνωσης
Q [MWh]	113.0 (146.2)*	32.1 (62.7)	23.8 (44.5)	23.7 (53.6)	17.7 (38.0)
FC [l ή m ³]	11301 (14624)	3213 (6273)	2044 (3816)	2372 (5362)	1520 (3262)
Κόστος [€]	9825 (12714)	2793 (5454)	1827 (3411)	2062 (4662)	1358 (2916)
Θεσσαλονίκη					
Q [MWh]	162.9 (197.2)	47.2 (79.4)	34.6 (56.5)	36.1 (67.7)	26.5 (47.8)
FC [l ή m ³]	16291 (19720)	4717 (7941)	3039 (4956)	3609 (6770)	2323 (4196)
Κόστος [€]	14029 (16982)	4062 (6838)	2032 (3313)	3108 (5830)	1504 (2717)

* Οι τιμές σε παρένθεση έχουν υπολογισθεί χωρίς τα θερμικά κέρδη του κτιρίου

Οι τιμές του πετρελαίου σε [€/l] υπολογίστηκαν για κάθε μήνα της περιόδου θέρμανσης σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη σύμφωνα με την [18]. Η περίοδος υπολογισμού ήταν από Οκτώβριο έως Απρίλιο 2016 (μέση τιμή πετρελαίου ~0.86 [€/l]). Η θερμογόνος δύναμη και οι τιμές φυσικού αερίου [€/kWh] για τη δεδομένη περίοδο ελήφθησαν από τις Εταιρείες Παροχής Αερίου των δύο πόλεων (ανάλογα με την κατηγορία στην οποία υπάγεται το κτίριο και την ετήσια κατανάλωση) προσαυξημένες με όλους τους φόρους κατανάλωσης [19,20]. Αναλυτικά οι τιμές καυσίμων για κάθε μήνα της περιόδου μελέτης δίδονται στην [14]. Οι μέσες τιμές τους ήταν ~0.077 [€/kWh] για την Αθήνα και ~0.058 [€/kWh] για τη Θεσσαλονίκη.

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των κυκλοφορητών PC (Pump Consumption) έγινε με βάση την απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύ. Για τους κυκλοφορητές σταθερών στροφών η

απορροφούμενη ισχύς θεωρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος και ίση με αυτή που δίνεται στον Πίνακα 2. Για τους ηλεκτρονικά ελεγχόμενους κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών η απορροφούμενη ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή μάζας τους. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης θεωρήθηκε ότι η παροχή μάζας στο σύστημα θέρμανσης με κυκλοφορητή inverter μειώνεται αναλογικά με τις θερμικές απώλειες του κτιρίου $BL(\theta)$. Διατηρώντας σταθερό το μονομετρικό ύψος της εγκατάστασης ανά περίπτωση μελέτης (Πίνακας 2) και για δεδομένη παροχή μάζας, η απορροφούμενη ισχύς σε [W] υπολογίζεται από την ηλεκτρονική εφαρμογή της εταιρείας η οποία κατασκευάζει τους κυκλοφορητές που επιλέχθηκαν [21]. Πολλαπλασιάζοντας την απορροφούμενη ισχύ των κυκλοφορητών με τη συχνότητα εμφάνισης n_i του κάθε θερμοκρασιακού διαστήματος προκύπτει η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τους κυκλοφορητές PC σε [Wh], η οποία θεωρήθηκε ότι είναι μηδενική όταν δεν υπάρχει απαίτηση για θέρμανση. Οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος, για κάθε μήνα της περιόδου θέρμανσης, υπολογίστηκαν από τη Δ.Ε.Η. για την κατηγορία του οικιακού τιμολογίου, προσαυξημένες με όλους τους φόρους κατανάλωσης [22], και δίδονται αναλυτικά στην [14]. Στον Πίνακα 4 δίνονται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [kWh_{el}] και το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος [€] ανά περίπτωση μελέτης:

Πίνακας 4: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [kWh_{el}] και κόστος ηλεκτρικού ρεύματος [€] σε όλη τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης ανά περίπτωση μελέτης για Αθήνα και Θεσσαλονίκη

	Χ.Θ.	Κ.Θ.Κ.		Κ.Εν.Α.Κ.	
	Αθήνα				
	Κυκλοφορητής σταθερών στροφών	Κυκλοφορητής σταθερών στροφών	Κυκλοφορητής μεταβλητών στροφών	Κυκλοφορητής σταθερών στροφών	Κυκλοφορητής μεταβλητών στροφών
PC [kWh _{el}]	421 (463)*	270 (374)	12 (20)	213 (374)	8 (13)
Κόστος [€]	143 (150)	116 (130)	71 (72)	106 (130)	70 (71)
Θεσσαλονίκη					
PC [kWh _{el}]	922 (978)	510 (596)	61 (75)	443 (596)	55 (74)
Κόστος [€]	232 (242)	159 (174)	79 (82)	147 (174)	78(82)

* Οι τιμές σε παρένθεση έχουν υπολογισθεί χωρίς τα θερμικά κέρδη του κτιρίου

Από τα αποτελέσματα που δίνονται στους Πίνακες 3 και 4 φαίνεται η μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους λειτουργίας που επιτυγχάνονται με την αντικατάσταση των συμβατικών λεβήτων και των κυκλοφορητών σταθερών στροφών με ενεργειακά αποδοτικότερα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, η ετήσια μείωση στην κατανάλωση θερμικής ενέργειας με την εγκατάσταση συστήματος χαμηλών θερμοκρασιών, χωρίς αναβάθμιση της θερμικής μόνωσης, είναι 26% για την Αθήνα και 27% για τη Θεσσαλονίκη (το αντίστοιχο ποσοστό για τους υπολογισμούς χωρίς τα θερμικά κέρδη είναι 29% και για τις δύο πόλεις). Στις περιπτώσεις που το κτίριο μονώνεται θερμικά σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας κυμαίνεται από 44% για κτίριο κατά Κ.Θ.Κ έως 84% για κτίριο χωρίς θερμική μόνωση και για τις δύο πόλεις (τα αντίστοιχα ποσοστά για τους υπολογισμούς χωρίς τα θερμικά κέρδη είναι 40% και 75%). Η χρήση κυκλοφορητή μεταβλητών στροφών οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας που υπερβαίνει το 87% σε όλες τις περιπτώσεις (87=98% ανάλογα με την περίπτωση). Επίσης, μεγάλο είναι και το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την αντικατάσταση και έτσι τα οφέλη δεν αφορούν μόνο στο περιβάλλον αλλά και στο κόστος διαβίωσης.

3.3. Κόστος νέου εξοπλισμού – περίοδος απόσβεσης της επένδυσης

Στο κόστος ενεργειακής αναβάθμισης του συστήματος θέρμανσης από σύστημα υψηλών θερμοκρασιών σε σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών λαμβάνονται υπόψη το κόστος των νέων θερμαντικών σωμάτων, της αντικατάστασης των παλαιών λεβήτων με λέβητες συμπύκνωσης Φ.Α. καθώς και το κόστος αντικατάστασης των κυκλοφορητών σταθερών στροφών με ηλεκτρονικά ελεγχόμενους μεταβλητών στροφών, σε κάθε περίπτωση που μελετάται (Α-Δ).

Οι αλλαγές που απαιτούνται ανά περίπτωση αναβάθμισης του συστήματος θέρμανσης περιγράφονται αναλυτικά στην [14]. Ο Πίνακας 5 δίνει το κόστος επένδυσης για την αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης σε κάθε περίπτωση που μελετήθηκε. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη το επιπλέον κόστος για τη θερμομόνωση του κτιρίου στις περιπτώσεις θερμικής αναβάθμισής του.

Πίνακας 5: Κόστος επένδυσης [€]για την ενεργειακή αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης

Αθήνα				
Από/Σε	Κ.Θ.Κ.		Κ.Εν.Α.Κ.	
	Σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών		Σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών	
Σύστημα υψηλών θερμοκρασιών	Αθήνα			
	Κόστος θερμαντικών σωμάτων	Κόστος λέβητα /κυκλοφορητή	Κόστος θερμαντικών σωμάτων	Κόστος λέβητα /κυκλοφορητή
	Χ.Θ.	-	3605	2035
	Κ.Θ.Κ.	6720	2335	5575
	Κ.Εν.Α.Κ.	-	-	5575
Θεσσαλονίκη				
Χ.Θ.	-	-	6282	2710
Κ.Θ.Κ.	8155	3955	7776	2710
Κ.Εν.Α.Κ.	-	-	7776	2710

Ο υπολογισμός της περιόδου απόσβεσης έγινε με την μέθοδο περιόδου αποπληρωμής (Pay back Period Method) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Περίοδος Απόσβεσης} = \frac{\text{Κόστος Επένδυσης}}{\text{Ετήσια Έσοδα}} \quad (9)$$

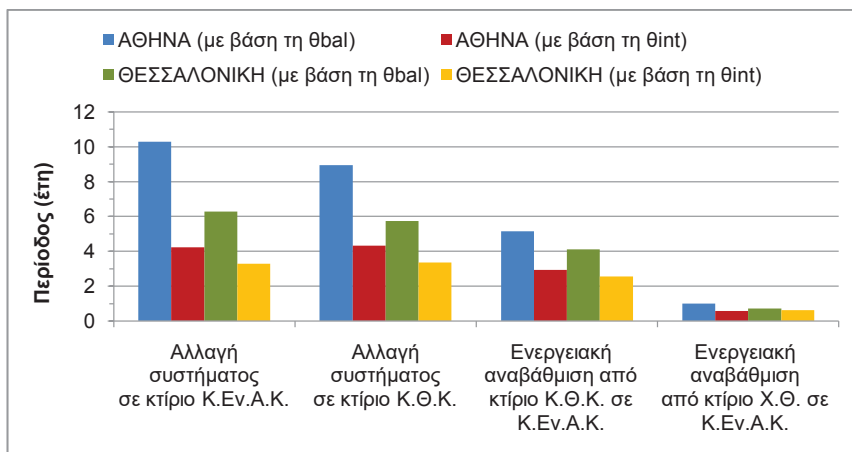
Ως *Ετήσια Έσοδα* ορίζονται η διαφορά κόστους στην κατανάλωση καυσίμου FC και στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος PC (πίνακες 3 και 4) ανά περίπτωση αναβάθμισης. Ο πίνακας 6 δίνει τα αποτελέσματα των ετήσιων εσόδων που προκύπτουν από την αναβάθμιση του συστήματος για κάθε περίπτωση μελέτης. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση στο λειτουργικό κόστος, όπως φαίνεται στους πίνακες 3 και 4, προκύπτει από τη μείωση στο κόστος καυσίμων, ενώ η συνεισφορά από τη μείωση του κόστους ηλεκτρικού ρεύματος είναι μικρή. Στον πίνακα θίνεται επίσης διάκριση ανάμεσα στα ετήσια οφέλη που προκύπτουν i) για την περίπτωση που η ενεργειακή ανάλυση γίνεται με βάση τη θερμοκρασία ισορροπίας του κτιρίου και ii) για την περίπτωση που η ενεργειακή ανάλυση γίνεται χωρίς τα θερμικά κέρδη στο κτίριο (τιμές σε παρένθεση στον πίνακα 6). Στη δεύτερη περίπτωση, προφανώς το όφελος είναι μεγαλύτερο γιατί το σύστημα θέρμανσης θεωρείται ότι λειτουργεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη χειμερινή περίοδο, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 6: Ετήσια Έσοδα (όφελος) σε € ανά περίπτωση αναβάθμισης του συστήματος θέρμανσης

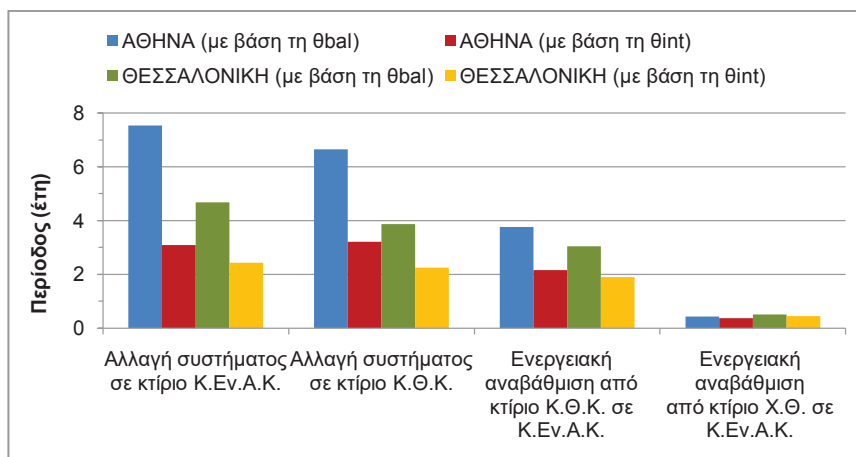
Από/Σε	Κ.Θ.Κ.	Κ.Εν.Α.Κ.
Σύστημα υψηλών θερμοκρασιών	Σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών	Σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών
Χ.Θ.	-	8540 (9879)
Κ.Θ.Κ.	1012 (2101)	1482 (2597)
Κ.Εν.Α.Κ.	-	740 (1805)
Θεσσαλονίκη		
Χ.Θ.	-	12678 (14425)
Κ.Θ.Κ.	2109 (3617)	2559 (4122)
Κ.Εν.Α.Κ.	-	1672 (3205)

* Οι τιμές σε παρένθεση αφορούν την ενεργειακή ανάλυση χωρίς θερμικά κέρδη στο κτίριο

Ο χρόνος στον οποίο θα γίνει απόσβεση της αρχικής επένδυσης δίνεται στην Εικόνα 3 για κάθε περίπτωση αναβάθμισης του συστήματος θέρμανσης. Σύμφωνα με την Οδηγία ErP, όλοι οι συμβατικοί λέβητες και κυκλοφορητές σταθερών στροφών θα πρέπει να αντικατασταθούν με λέβητες συμπύκνωσης και κυκλοφορητές inverter αντίστοιχα στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αν λοιπόν ως Κόστος Επένδυσης θεωρηθεί μόνο το κόστος των θερμαντικών σωμάτων (εφόσον ο λέβητας και ο κυκλοφορητής θα πρέπει να αντικατασταθούν ούτως ή άλλως), τότε η περίοδος απόσβεσης είναι ακόμη μικρότερη. Η Περίοδος Απόσβεσης σε αυτήν την περίπτωση δίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 3: Περίοδος απόσβεσης της αλλαγής συστήματος θέρμανσης ανά περίπτωση αναβάθμισής του



Εικόνα 4: Περίοδος απόσβεσης της αλλαγής συστήματος θέρμανσης ανά περίπτωση αναβάθμισής του (χωρίς το κόστος του λέβητα και του κυκλοφορητή)

Η περίοδος απόσβεσης για την αλλαγή συστήματος σε ένα κτίριο με θερμική προστασία κατά Κε.Εν.Α.Κ. είναι 10.3 έτη στην Αθήνα και 6.3 έτη στη Θεσσαλονίκη. Στην περίπτωση ενός κτιρίου με θερμική μόνωση σύμφωνα με τον Κ.Θ.Κ. οι αντίστοιχες περίοδοι για τις δύο πόλεις είναι 9 και 5.7 έτη. Όταν αναβαθμίζεται και η θερμική προστασία του κτιρίου από τον Κ.Θ.Κ. σε Κ.Εν.Α.Κ. η περίοδος απόσβεσης είναι κάτω από τα 5 έτη και για τις δύο πόλεις, ενώ στην περίπτωση κτιρίων χωρίς θερμομόνωση η περίοδος αυτή είναι μικρότερη του ενός έτους. Η ενεργειακή και οικονομική ανάλυση με βάση την ισοσταθμισμένη εσωτερική θερμοκρασία θ_{int} δίνει μικρότερες περιόδους απόσβεσης της αλλαγής συστήματος θέρμανσης σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης. Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος απόσβεσης για την αλλαγή συστήματος σε ένα κτίριο με θερμική προστασία κατά Κ.Εν.Α.Κ. ή κατά Κ.Θ.Κ. είναι περίπου 4.3 έτη στην Αθήνα ενώ για τη Θεσσαλονίκη η αντίστοιχη περίοδος είναι περίπου 3.3 έτη. Όταν αναβαθμίζεται και η θερμική προστασία του κτιρίου από τον Κ.Θ.Κ. σε Κ.Εν.Α.Κ. η περίοδος απόσβεσης είναι μικρότερη από 3 έτη και για τις δύο πόλεις, ενώ στην περίπτωση κτιρίων χωρίς θερμομόνωση η περίοδος αυτή είναι μικρότερη του ενός έτους. Βέβαια, η δεύτερη προσέγγιση,

όπως αναφέρθηκε, είναι θεωρητική διότι πάντοτε υπάρχουν κάποιες εσωτερικές πηγές θερμότητας καθώς και ηλιακή ακτινοβολία που συνεισφέρουν στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης δεν είναι παρά μια προσέγγιση της πραγματικότητας, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραδοχές που γίνονται σε σχέση με τη λειτουργία του συστήματος, τη συμπεριφορά των χρηστών αλλά και την ακρίβεια των δεδομένων (κλίματος, κτιρίου, βαθμών απόδοσης κ.λπ.). Για το λόγο αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί πως η χρονική διάρκεια απόσβεσης της αλλαγής συστήματος θέρμανσης είναι ανάμεσα στα αποτελέσματα που προκύπτουν με τις δύο προσεγγίσεις για τα θερμικά κέρδη του κτιρίου. Εάν δε ως κόστος επένδυσης ληφθεί υπόψη μόνο το κόστος αντικατάστασης των θερμαντικών σωμάτων, τότε η περίοδος απόσβεσης για την Αθήνα κυμαίνεται από 0.4 έως 7.5 έτη ενώ για τη Θεσσαλονίκη από 0.5 έως 4.5 έτη, ανάλογα με την περίπτωση αναβάθμισης. Για ενεργειακή και οικονομική ανάλυση με βάση την ισοσταθμισμένη εσωτερική θερμοκρασία θ_{int} , η περίοδος απόσβεσης είναι μικρότερη από 3 έτη για όλες τις περιπτώσεις (Εικ. 4). Και εδώ, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πραγματική χρονική διάρκεια είναι ανάμεσα στα αποτελέσματα σύμφωνα με τις δύο προσεγγίσεις.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της Οδηγίας ErP στα συστήματα θέρμανσης θερμού νερού επιβάλλει τη μετάβαση από συστήματα υψηλών θερμοκρασιών σε συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών νερού, στα οποία η πηγή θερμότητας θα είναι είτε λέβητας συμπύκνωσης είτε αντλία θερμότητας. Αντίστοιχα επιβάλλεται και η εγκατάσταση αποκλειστικά ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κυκλοφορητών μεταβλητών στρωφών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη από την αντικατάσταση ενός συμβατικού συστήματος κεντρικής θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών, με λέβητα πετρελαίου και κυκλοφορητή σταθερών στρωφών, με ένα σύστημα χαμηλών θερμοκρασιών με λέβητα συμπύκνωσης και κυκλοφορητή μεταβλητών στρωφών, σε ένα τυπικό κτίριο κατοικιών στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις όπου στο κτίριο γίνεται αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης χωρίς αναβάθμιση της θερμικής προστασίας του κτιρίου και οι περιπτώσεις όπου το κτίριο θερμομονώνεται κατά Κ.Εν.Α.Κ. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε η διαστασιολόγηση των συστημάτων ανά περίπτωση και η ενεργειακή ανάλυση για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου και της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μείωση στην κατανάλωση θερμικής ενέργειας, χωρίς αναβάθμιση της θερμικής μόνωσης του κτιρίου, είναι περίπου 26% και για τις δύο πόλεις ενώ στις περιπτώσεις που το κτίριο μονώνεται θερμικά σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ., η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας κυμαίνεται από 44% για κτίριο με θερμομόνωση κατά Κ.Θ.Κ έως 84% για κτίριο χωρίς θερμική μόνωση. Η χρήση κυκλοφορητή μεταβλητών στρωφών οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας που κυμαίνεται από 87+98% ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται. Ανάλογη με την εξοικονόμηση της ενέργειας που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση μελέτης είναι και η εξοικονόμηση του λειτουργικού κόστους, δηλαδή του κόστους καυσίμου και ηλεκτρικού ρεύματος. Η ετήσια μείωση κόστους με την εγκατάσταση συστήματος χαμηλών θερμοκρασιών, χωρίς αναβάθμιση της θερμικής μόνωσης του κτιρίου, είναι περίπου 35% για την Αθήνα και 50% για τη Θεσσαλονίκη. Όταν το κτίριο μονώνεται θερμικά σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. η ετήσια μείωση του λειτουργικού κόστους κυμαίνεται στην Αθήνα από 51% για κτίριο κατά Κ.Θ.Κ έως 86% για κτίριο χωρίς θερμική μόνωση. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τη Θεσσαλονίκη είναι από 63% έως 89%. Η περίοδος απόσβεσης κυμαίνεται από 3 έως 10 έτη χωρίς αναβάθμιση της θερμικής προστασίας του κτιρίου και από 1 έως 5 χρόνια με αναβάθμιση (χωρίς να ληφθεί υπόψη το κόστος της θερμομόνωσης), ανάλογα με την περίπτωση. Βέβαια, οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, οι οποίες χαρακτηρίζονται πάντα από κάποια αβεβαιότητα ως προς τη μελλοντική τους συμπεριφορά, καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ürge-Vorsatz, D., Cabeza L.F., Serrano S., Barreneche C., and Petrichenko K., 2015, "Heating and cooling energy trends and drivers in buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp. 85–98.
- [2] ODYSSEE-MURE, 2015, "Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors - An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases", Report from the ODYSSEE-MURE project co-funded by the Intelligent Energy Europe programme of the European Union.
- [3] <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/main-tables>, (last accessed 16th.09.15).

- [4] Eurostat, Statistical books, 2017, "Energy balance sheets, 2015 data", European Union.
- [5] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, 2009, "establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products", Official Journal of the European Union, 31.10.2009, pp. L 285/10–35.
- [6] Commission Regulation (EU) No 813/2013, "implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for space heaters and combination heaters", Official Journal of the European Union, 6.9.2013, pp. L 239/136–161.
- [7] Commission Regulation (EU) No 814/2013, "implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water heaters and hot water storage tanks", Official Journal of the European Union, 6.9.2013, pp. L 239/162–183.
- [8] Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council, 2010, "on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products", Official Journal of the European Union, 18.6.2010, pp. L 153/1–12.
- [9] Commission delegated Regulation (EU) No 811/2013, "supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labeling of space heaters, combination heaters, packages of space heater, temperature control and solar device and packages of combination heater, temperature control and solar device", Official Journal of the European Union, 6.9.2013, pp. L 239/1–82.
- [10] Commission delegated Regulation (EU) No 812/2013, "supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labeling of water heaters, hot water storage tanks and packages of water heater and solar device", Official Journal of the European Union, 6.9.2013, pp. L 239/83–135.
- [11] Commission Regulation (EC) No 641/2009, "implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products", Official Journal of the European Union, 23.7.2009, pp. L 191/35–41.
- [13] Κομνηνός Γ., 2013, "Επίδραση της εφαρμογής του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) στα θερμικά και ψυκτικά φορτία και στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη σε κτίρια κατοικιών", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [14] Πίτσας Φ., 2016, "Συστήματα θέρμανσης με λέβητες συμπύκνωσης – Ενεργειακή ανάλυση σε κτίριο κατοικιών σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [15] ASHRAE Handbook - Fundamentals, 1985, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta Geo., USA, chap. 26.
- [16] Ζαγανά Παπαβασιλείου Π., 2013, "Επικαιροποίηση βάσης θερμοκρασιακών δεδομένων Αθήνας και Θεσσαλονίκης για ενεργειακές μελέτες". Χρονική περίοδος 1982-2012, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- [17] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε.), 2012, "Τεχνική Οδηγία Τ.Ε.Ε. (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) 20701-1/2010, Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης", Αθήνα.
- [18] Υπουργείο Ανάπτυξης και Ανταγωνιστικότητας, "Εβδομαδιαίο δελτίο επισκόπησης τιμών καυσίμων", 29 Απριλίου 2016, <http://www.fuelprices.gr>
- [19] Εταιρεία Παροχής Αερίου (ΕΠΑ) Αττικής, "Τιμολόγια φυσικού αερίου οικιακής χρήσης", <http://www.aerioattikis.gr>
- [20] Εταιρεία Παροχής Αερίου (ΕΠΑ) Θεσσαλονίκης, "Τιμολόγηση-Τιμές", <http://www.epathessaloniki.gr>
- [21] WILO, Pioneering for You, <http://www.wilo.gr>
- [22] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), "Οικιακό Τιμολόγιο-Γ1", <http://www.dei.gr>

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΩΝ

Θ. Σλίνη^{1*}, Κ. Τ. Παπακώστας², Ν. Μουσιόπουλος¹

¹Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη, *email: thslini@auth.gr

²Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ταχέως αυξανόμενη χρήση ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα έχει ήδη προκαλέσει ανησυχίες σχετικά με την εξάντληση των ενεργειακών πόρων και τις σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή. Η συμβολή των κτιρίων, κατοικιών και τριτογενούς τομέα, στην ενεργειακή κατανάλωση αντιπροσωπεύει το ένα πέμπτο της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια εκτιμάται ότι θα αυξάνεται κατά μέσο όρο 1.4% ετησίως από το 2012 έως το 2040. Η αύξηση του πληθυσμού, η έμφαση στη βελτίωση των επιπέδων θερμικής άνεσης, καθώς και η αύξηση του χρόνου παραμονής μέσα στα κτίρια καθιστούν σε ένα βαθμό σίγουρο ότι η ανοδική τάση της ενεργειακής ζήτησης θα συνεχιστεί και στο άμεσο μέλλον.

Στην Ελλάδα, υπό το πρίσμα του κανονισμού για την «Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων» (KENAK), είναι υποχρεωτική η διεξαγωγή ενεργειακών ελέγχων στα υφιστάμενα κτίρια, υπό προϋποθέσεις, ενώ ταυτόχρονα θεσμοθετείται ο βιώσιμος σχεδιασμός των νέων. Στην παρούσα εργασία, αναλύονται τα στοιχεία που προέκυψαν κατά την έκδοση Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων της περιόδου 2011-2016, ανά περιφέρεια και κλιματική ζώνη. Συγκεκριμένα, η μέση κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στα δημόσια κτίρια και τις κατοικίες (με το διαχωρισμό σε μονοκατοικίες και πολυκατοικίες) αναλύεται με βάση τη γεωγραφική/κλιματική ζώνη στην οποία ανήκουν, ενώ γίνεται προσπάθεια διασύνδεσης της κατανάλωσης ενέργειας με τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα ανά κλιματική ζώνη για την ίδια περίοδο. Τα δεδομένα προέρχονται από τις Περιφερειακές Ενότητες (Π.Ε.) Ηρακλείου (κλιματική ζώνη Α), Αθηνών (κλιματική ζώνη Β), Θεσσαλονίκης (κλιματική ζώνη Γ) και Φλώρινας (κλιματική ζώνη Δ). Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η κατανόηση των προτύπων κατανάλωσης της ενέργειας που παρέχεται στους τελικούς χρήστες, η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη προβλέψεων για τη χρήση ενέργειας. Η αποτύπωση τυπικών συμπεριφορών και τάσεων ανά χρήση κτιρίων και περιοχή δύναται να αποτελέσει τη βάση του απαραίτητου στρατηγικού σχεδιασμού από τοπικούς και εθνικούς φορείς για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά: κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, κλιματικές ζώνες, θερμοκρασία, βαθμομέρες θέρμανσης, βαθμομέρες ψύξης

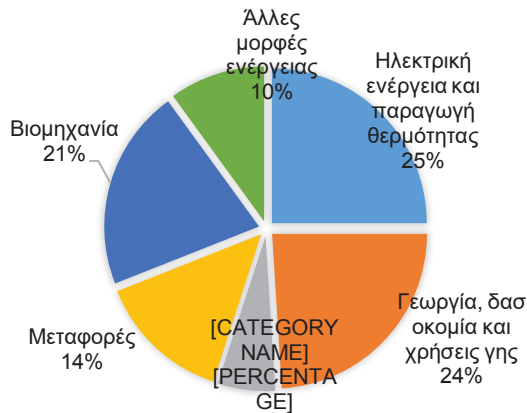
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αποτελέσματα της Συμφωνίας των Παρισίων (COP 2015) αντικατοπτρίζουν το ευρέως αποδεκτό γεγονός ότι η μετάβαση σε ένα παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα το οποίο θα χαρακτηρίζεται από χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι εξαιρετικά πιθανή, ακόμη και αναπόφευκτη τα επόμενα χρόνια. Η δέσμευση για επιμερισμό των προσπαθειών ώστε οι εκπομπές να μειωθούν κατά 30% (με αναφορά τις εκπομπές του 2005) αποτελεί δέσμευση της ευρωπαϊκής πολιτικής για το 2030. Σε αυτό συμβάλλει το διαρκώς μειωμένο κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όσο και οι εντατικές προσπάθειες και δράσεις που προέρχονται από φορείς, κρατικούς και μη, τον επιχειρηματικό τομέα, αλλά και τις κοινωνικές ομάδες.

Η αύξηση της θερμοκρασίας, οι έντονες βροχοπτώσεις, οι μακρές περίοδοι ξηρασίας, η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας και η συχνότητα και σοβαρότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων επηρεάζουν άμεσα τις ανάγκες για ενέργεια, την ποσότητα δηλαδή που παράγεται, μεταφέρεται και καταναλώνεται, τις υπάρχουσες υποδομές αλλά και το μελλοντικό σχεδιασμό τους. Η παραγωγή και χρήση ενέργειας συνδέεται με πολλές άλλες πτυχές της σύγχρονης ζωής, όπως η κατανάλωση νερού, η χρήση αγαθών και υπηρεσιών, οι μεταφορές, η οικονομική ανάπτυξη, η χρήση γης και η αύξηση του πληθυσμού. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί πως η παραγωγή και χρήση ενέργειας (η οποία προέρχεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα) συμβάλλει επίσης στην κλιματική αλλαγή, αντιπροσωπεύοντας ένα ποσοστό που υπερβαίνει το 84% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα [1].

Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής σε περιοχές της Ευρώπης έχουν μελετηθεί εκτενώς [2-4]. Οι περισσότερες μελέτες προβλέπουν μείωση της ζήτησης θέρμανσης και αξιοσημείωτη αύξηση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για ψύξη [5, 6].

Οι εκπομπές θερμοκηπικών αερίων από τον ενεργειακό τομέα αντιπροσωπεύουν περίπου το 68% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα (εικόνα 1)[7]. Στην Ευρώπη, οι εκπομπές CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων προσεγγίζουν την τιμή των 3.2Gt, δηλαδή περίπου το 55% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (από καύσιμα χωρίς τις μεταφορές) το 2015 (εικόνα 2) [8].



Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή των ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με στοιχεία της Environmental Protection Agency (EPA).



Εικόνα 2: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ε.Ε. για το έτος 2015.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω διαπιστώσεις γίνεται άμεσα αντιληπτό το γεγονός πως η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης συγκαταλέγεται μεταξύ των πιο σημαντικών προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν στο εγγύς μέλλον. Η μείωση της ζήτησης ενέργειας και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας συσκευών, διεργασιών και εγκαταστάσεων συνιστούν έναν από τους πέντε βασικούς στόχους της ευρωπαϊκής ενεργειακής στρατηγικής. Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20% για το 2020 είναι πρωταρχικός στόχος στις πολιτικές ενεργειακού σχεδιασμού, αποσκοπώντας στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, εκτός από τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν από την μείωση στο λειτουργικό κόστος για τους καταναλωτές, την ασφάλεια του εφοδιασμού, την υγιή ανταγωνιστικότητα, τη βιωσιμότητα της οικονομίας και τη δημιουργία θέσεων απασχόλησης. Η προτεινόμενη ενεργειακή πολιτική μετά το 2020 προτείνει περαιτέρω έναν δεσμευτικό στόχο της ΕΕ για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 30% ως το 2030 [9].

Τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη καταγράφηκε σημαντική πρόοδος και η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ήταν μόλις κατά 1.6% πάνω από το στόχο του 2020 ενώ η τελική κατανάλωση ενέργειας ήταν σε ποσοστό 2.2% κάτω από το στόχο του 2020 [9]. Ωστόσο, λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών και των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας το 2015 αυξήθηκε κατά 1.5% περίπου και η τελική κατανάλωση ενέργειας κατά 2% περίπου σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2014, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι το 2014 ήταν ένα εξαιρετικά θερμό κλιματολογικά έτος [9, 10].

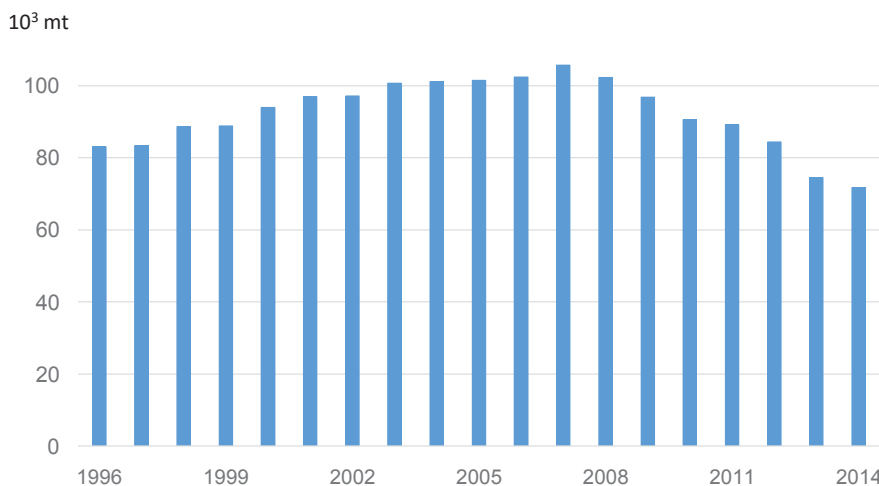
Η Ελλάδα επηρεάζεται από την αλλαγή του κλίματος: κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου η θερμοκρασία δύναται κατά τόπους να αγγίξει τους 36°C για αρκετές μέρες και συχνά επικρατούν συνθήκες καύσωνα και ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου, τόσο στην ηπειρωτική όσο και στη νησιωτική χώρα [10, 11]. Κατά συνέπεια, ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής σε κτίρια και κατασκευές που λειτουργούν κάτω από το μεσογειακό κλίμα επηρεάζει ιδιαίτερα την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Οι Mirasdegis κ.ά. [12] υποστηρίζουν ότι η κλιματική αλλαγή θα αυξήσει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα κατά ποσοστό 3.6÷5.5% και ότι η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να αυξήσει τη ζήτηση ενέργειας αλλά και να αλλάξει τη δυνατότητα παραγωγής και ασφαλούς μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Ο τομέας των κτιρίων αντιπροσωπεύει το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης και το 36% των εκπομπών CO₂ στην Ευρώπη, με τα νέα κτίρια κατά μέσο όρο να καταναλώνουν λιγότερα από 3 έως 5 l πετρελαίου θέρμανσης ανά m² ετησίως και τα παλαιότερα κτίρια να απαιτούν περίπου 25 l ανά m² ετησίως [13]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται από 0.45 σε 4.6% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος [14]. Συνεπώς, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας καθορίζεται μέσω ειδικών στόχων και πολιτικών, όπως για παράδειγμα η

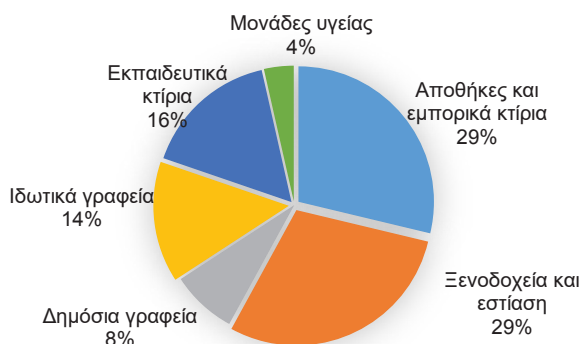
οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (2012/27/ΕΕ). Η οδηγία απαιτεί όλα τα νέα κτίρια να είναι σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας μετά το 2020 και όλα τα νέα δημόσια κτίρια μετά τα τέλη του 2018. Σύμφωνα με την ίδια οδηγία, κτίρια που ανήκουν ή χρησιμοποιούνται από δημόσιους φορείς ή/και την κεντρική κυβέρνηση θα πρέπει να ανακαινισθούν με σκοπό την αναβάθμιση της ενεργειακής τους απόδοσης με συγκεκριμένο ετήσιο ρυθμό (ποσοστό τουλάχιστον 3%). Επιπροσθέτως, οι εθνικές κυβερνήσεις υποχρεούνται να αγοράζουν κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης για την ενεργειακή απόδοση, βάσει της ίδιας οδηγίας, για την εφαρμογή των εθνικών στόχων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, οι συνολικές εκπομπές ρύπων που προέρχονται από την κατανάλωση ενέργειας (και επομένως η συνολική κατανάλωση) στην Ελλάδα παρουσίασαν φθίνουσα τάση κατά την περίοδο 2007-2014 (εικόνα 3) ενώ η τάση ήταν αυξητική μέχρι το έτος 2007 [15]. Πιο συγκεκριμένα, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας το 2012 έφθασε σε περίπου 27 Mtoe (314.7 TWh), με μικρή αύξηση κατά 0.5% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2011 και μείωση κατά 12% για την περίοδο 2007-2012.



Εικόνα3: Συνολικές εκπομπές CO₂ από την κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1996-2014.

Σε μια προσπάθεια προσδιορισμού της τρέχουσας κατάστασης και των τάσεων της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας σε δημόσια κτίρια (γραφεία, βιβλιοθήκες, γραφεία εκπαίδευσης και υγείας, χώρους συγκέντρωσης, αίθουσες συνεδρίων, θέατρα, μουσεία, δικαστήρια, κέντρα γυμναστικής κ.ά.) και κτίρια κατοικιών (πολυκατοικίες και μονοκατοικίες), στην παρούσα εργασία αναλύονται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των ελέγχων ενεργειακής απόδοσης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας [16]. Τα στοιχεία καταμέτρησης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ) καθώς και η ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και συστήματα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) αναλύονται για τις Π.Ε. Ηρακλείου, Αθηνών, Θεσσαλονίκης και Φλώρινας για την περίοδο 2011-16 (σε 4 ετήσια τρίμηνα). Τα δεδομένα αφορούν σε κτίρια στα οποία έγινε ενεργειακή επιθεώρηση κατά την περίοδο αυτή, ανεξάρτητα από το έτος κατασκευής τους. Οι επιλεγμένες περιοχές αντιστοιχούν σε 4 κλιματικές ζώνες, δηλαδή στη ζώνη Α (Ηράκλειο), Β (Αθήνα), Γ (Θεσσαλονίκη) και Δ (Φλώρινα). Για τις ζώνες Α, Β και Γ υπάρχουν επαρκή δεδομένα, ενώ για τη ζώνη Δ, στην περιοχή της Φλώρινας η οποία είναι συγκριτικά η πλέον αραιοκατοικημένη με ελάχιστα δημόσια κτίρια, τα δεδομένα είναι κατά πολύ λιγότερα σε σχέση με τις άλλες ζώνες. Οι κλιματικές ζώνες βάσει των βαθμοημερών θέρμανσης περιγράφονται αναλυτικά στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ, ΦΕΚ 407 / 9.4.2010). Η κατανομή των μη οικιστικών κτιρίων στην Ελλάδα για το 2015 παρουσιάζεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4: Κατανομή μη οικιακών κτιρίων στην Ελλάδα για το 2015 (στοιχεία της Ε.Ε 2016).

Για την ανάγκη της τρέχουσας περιγραφικής στατιστικής μελέτης, εκτιμήθηκαν δείκτες όπως ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και τα τεταρτημόρια σε τριμηνιαία και ετήσια κλίμακα. Επίσης πραγματοποιήθηκε γραφική απεικόνιση των δεδομένων προκειμένου να ανιχνευθεί και να καταγραφεί οποιαδήποτε εμφανής τάση, εποχικότητα ή απόκλιση. Τέλος, εφαρμόστηκαν οι έλεγχοι Mann-Whitney και Kruskal-Wallis με σκοπό τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας (ανά χρήση και τη συνολική μέση ετήσια τιμή) με τις ποιοτικές μεταβλητές (την Π.Ε., την κατηγορία και τον τύπο των κτιρίων), ώστε να αποδειχθεί αν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση (σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05) μεταξύ των χαρακτηριστικών της κάθε μεταβλητής.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα κυριότερα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στους πίνακες 1-3 και στην εικόνα 5 όπου δίδονται οι μέσες ετήσιες τιμές κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά χρήση, ανά περιοχή και κατηγορία κτιρίων για τα έτη 2011-16. Είναι χαρακτηριστικό πως η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση στα κτίρια κατοικιών (και των δύο κατηγοριών) είναι σταθερά υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες χρήσεις σε όλες τις περιφέρειες, με τις τιμές να κυμαίνονται από 125.3 kWh/m² (πολυκατοικίες στο Ηράκλειο) έως 489.3 kWh/m² (μονοκατοικίες στη Φλώρινα). Στα δημόσια κτίρια, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση είναι υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες χρήσεις μόνο για τη Θεσσαλονίκη και τη Φλώρινα, όπου οι ανάγκες για θέρμανση είναι σαφώς υψηλότερες λόγω κλιματολογικών συνθηκών, με τιμές 167.7 και 224.2 kWh/m² αντίστοιχα. Η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση στα οικιακά κτίρια εμφανίζει μια στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση στην περίπτωση των μονοκατοικιών σε σύγκριση με τις πολυκατοικίες (σύμφωνα με τον έλεγχο Mann-Whitney). Αντίθετα όπως αναμενόταν, στην περιοχή της Φλώρινας η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη είναι ιδιαίτερα χαμηλή (41.1 kWh/m² για δημόσια κτίρια και 14 kWh/m² για κατοικίες) για το σύνολο των κτιρίων, ενώ υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ δημόσιων και οικιακών κτιρίων (σύμφωνα με τον έλεγχο Mann-Whitney). Αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό (δεδομένα διαθέσιμα μόνο για τα δημόσια κτίρια) παρατηρείται μια παρόμοια συμπεριφορά σε όλους τους νομούς με τις χαμηλότερες καταναλώσεις να σημειώνονται στη Φλώρινα, όπου το δείγμα των δημόσιων κτιρίων είναι μικρό. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί πως σε σχέση με το ΖΝΧ οι περιφέρειες των περιοχών της Βόρειας Ελλάδας (Θεσσαλονίκη και Φλώρινα) καταγράφουν τις μέγιστες τιμές, ιδιαίτερα στην κατηγορία των πολυκατοικιών.

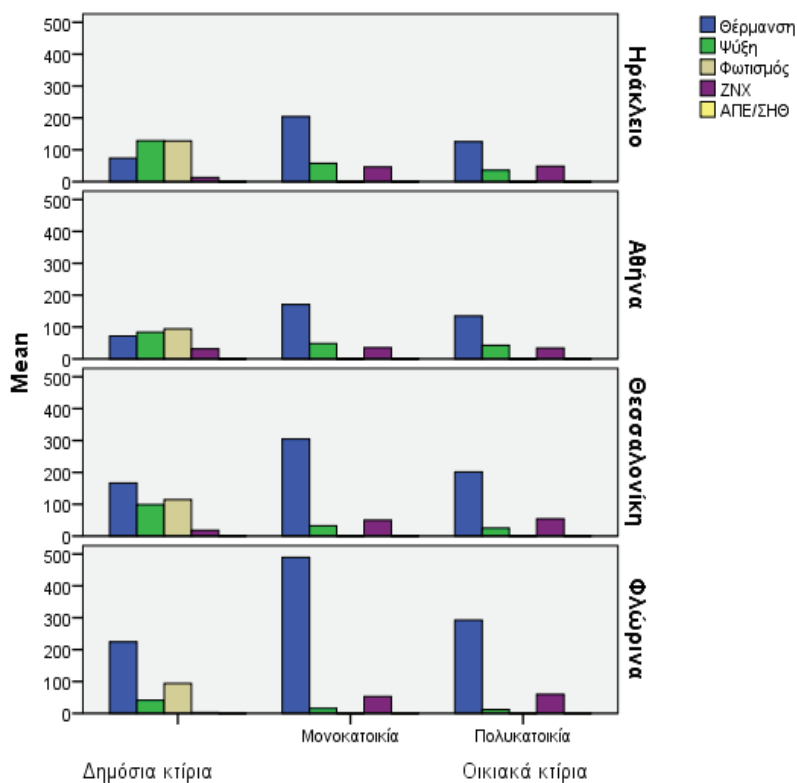
Πίνακας 1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (τ.α.) σε kWh/m² της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά χρήση στις Π.Ε. Ηρακλείου, Αθήνας, Θεσσαλονίκης και Φλώρινας για την περίοδο 2011-2016.

Δημόσια κτίρια	Ηράκλειο	Αθήνα	Θεσσαλονίκη	Φλώρινα
	Μέση τιμή (τ. α.)	Μέση τιμή (τ. α.)	Μέση τιμή (τ. α.)	Μέση τιμή (τ. α.)
Θέρμανση	74.1 (29.7)	65.9 (38.4)	167.7 (75.2)	224.2 (38.8)
Ψύξη	128.9 (59.5)	86.4 (34.5)	99.4 (44.2)	41.1 (14.4)
Φωτισμός	127.1 (31.3)	95.1 (41.9)	114.9 (32.1)	94.0 (10.2)
ZNX	13.7 (13.0)	26.4 (49.9)	19.4 (19.1)	2.6 (0.5)
ΑΠΕ/ΣΗΘ	0.34 (1.2)	0.3 (0.6)	0.4 (2.0)	0.0 (0.0)
Συνολική Μέση ετήσια	343.5 (93.4)	273.6 (92.7)	401.2 (121.1)	361.9 (35.0)
Οικιακά κτίρια				
Μονοκατοικία				
Θέρμανση	204.2 (12.1)	170.4 (26.2)	304.2 (37.1)	489.3 (101.2)
Ψύξη	57.8 (8.6)	48.2 (6.6)	32.6 (4.3)	15.9 (4.7)
Φωτισμός	μδ	μδ	μδ	μδ
ZNX	45.6 (7.6)	34.9 (8.3)	49.8 (6.3)	52.6 (11.3)
ΑΠΕ/ΣΗΘ	0.23 (1.0)	0.09 (0.2)	0.1 (0.3)	0.008 (0.04)
Συνολική Μέση ετήσια	307.6 (15.6)	253.4 (29.4)	386.6 (41.6)	557.9 (105.5)
Πολυκατοικία				
Θέρμανση	125.3 (10.0)	134.7 (23.8)	201.2 (22.4)	292.5 (88.4)
Ψύξη	35.9 (5.7)	42.5 (10.4)	25.2 (3.7)	12.2 (7.9)
Φωτισμός	μδ	μδ	μδ	μδ
ZNX	48.7 (6.5)	34.1 (7.6)	54.3 (6.4)	59.5 (16.1)
ΑΠΕ/ΣΗΘ	0.0035 (0.006)	0.3 (0.9)	0.1 (0.2)	0.0 (0.0)
Συνολική Μέση ετήσια	209.9 (7.1)	211.2 (30.2)	280.7 (27.5)	364.2 (92.2)

μδ: μη διαθέσιμο

Στην περίπτωση της ενδεικτικής καταγραφής της κατανάλωσης ενέργειας σε ετήσια βάση, παρατηρείται μια ελαφρά διαφοροποίηση μεταξύ των ετών η οποία δεν είναι στατιστικά σημαντική και για τις δύο κατηγορίες κτιρίων (εκτός του ZNX μεταξύ πολυκατοικιών και μονοκατοικιών). Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου Kruskal-Wallis (πίνακας 2) αποδεικνύεται ότι η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη διαφέρει σημαντικά μεταξύ των Π.Ε. για τα δημόσια κτίρια.

Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, σε όλους τους τύπους κτιρίων, παρουσιάζει μια αυξητική τάση όσο πηγαίνουμε από τις νοτιότερες κλιματικές ζώνες προς τις βορειότερες, με μόνη εξαίρεση τις μονοκατοικίες και τα δημόσια κτίρια στη ζώνη Α. Ο κυριότερος παράγοντας διαμόρφωσης της συνολικής τιμής κατανάλωσης είναι η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση για τις Ζώνες Β, Γ και Δ, ενώ στη Ζώνη Α σημαντική είναι και η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη, ιδιαίτερα στα δημόσια κτίρια.

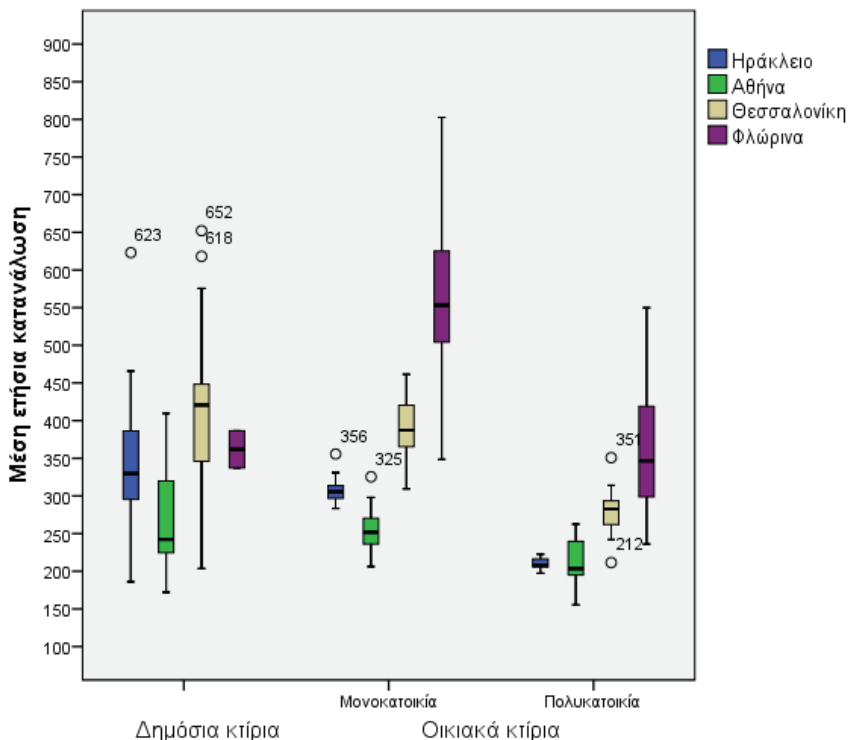


Εικόνα 5: Η μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε δημόσια και οικιακά κτίρια (σε kWh/m²) ανά κατηγορία χρήσης στις Π.Ε. Ηρακλείου, Αθηνών, Θεσσαλονίκης, Φλώρινας για την περίοδο 2011-16.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα του ελέγχου Kruskal-Wallis για την κατανομή της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας σε δημόσια και οικιακά (σε παρένθεση) κτίρια ως προς τις μεταβλητές της Π.Ε., του έτους και της κατηγορίας κτιρίου (δημόσια-οικιακά και σε παρένθεση για τα οικιακά: μονοκατοικία-πολυκατοικία).

Χρήση	Π.Ε.	Έτος	Κατηγορία
Θέρμανση	** (**)	- (-)	** (**)
Ψύξη	** (**)	- (-)	** (**)
Φωτισμός	- (μδ)	- (μδ)	μδ(μδ)
ΖΝΧ	- (**)	- (**)	** (-)
ΑΠΕ	- (**)	- (-)	** (-)
Μέση συνολική κατανάλωση	- (**)	- (-)	** (**)

Οι στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις σημειώνονται με **, σε στάθμη σημαντικότητας 0.05 (μδ: μη διαθέσιμο).



Εικόνα 6: Η μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε δημόσια και οικιακά κτίρια (σε kWh/m²) ανά Π.Ε.: Ηράκλειο, Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Φλώρινα, για την περίοδο 2011-16.

Η ανατροπή στην αναλογική αύξηση από ζώνη σε ζώνη οφείλεται στη σημαντική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στις μονοκατοικίες της Ζώνης Α (το οποίο εξηγείται παρακάτω) και η σημαντική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη στα δημόσια κτίρια της ζώνης αυτής.

Αντίστοιχα, η κατανάλωση ενέργειας για όλες τις χρήσεις (πλην του φωτισμού όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία) καταγράφει σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά ανά περιφέρεια για τα οικιακά κτίρια (πίνακες 1 και 2). Τα αποτελέσματα των ελέγχων επιβεβαιώνουν ότι μεταξύ δημόσιων και οικιακών κτιρίων καταγράφεται χαρακτηριστική διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας για κάθε χρήση, δηλαδή οι τιμές διαφοροποιούνται σημαντικά, ενώ ειδικότερα στα οικιακά η διαφοροποίηση της κατανάλωσης ενέργειας αποτυπώνεται συστηματικά μόνο στη θέρμανση, στην ψύξη και στη μέση ετήσια τιμή της μεταξύ μονοκατοικιών και πολυκατοικιών (πίνακες 1 και 2) ενώ για τις άλλες χρήσεις δεν εμφανίζεται κάποια χαρακτηριστική συμπεριφορά.

Παράλληλα, ο υπολογισμός των συντελεστών συσχέτισης Spearman και Kendall, που αποσκοπούν στην ανίχνευση συστηματικών σχέσεων και τη γραμμική σύνδεση των μεταβλητών, ενισχύει τα παραπάνω εξαχθέντα συμπεράσματα. Στην ανάλυση αυτή συμπεριλήφθηκε και η μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρα όπως ορίζεται στην Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας με τα Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών (ΤΟΤΕΕ 201701-3/2010). Η γεωγραφική θέση και η κατηγορία του κτιρίου αποδεικνύονται πως συσχετίζονται ισχυρά με την κατανάλωση ενέργειας για κάθε επιμέρους χρήση, αλλά και με τη μέση ετήσια τιμή της. Η θερμοκρασία επίσης παρουσιάζει σημαντική συσχέτιση (πίνακας 3) με την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, ΖΝΧ και τη συνολική μέση ετήσια τιμή της.

Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης κατά Spearman και Kendall τ μεταξύ της Π.Ε., τύπου και κατηγορίας κτιρίου και της θερμοκρασίας.

	Π.Ε.	Τύπος (δημόσια-οικιακά)	Κατηγορία (μονοκατοικία-πολυκατοικία)	Θερμοκρασία
Θέρμανση	0.71**	-0.48**	-0.35	-0.23**
Ψύξη	-0.69**	0.61**	-0.20	0.23**
Φωτισμός	-0.18**	μδ	μδ	0.08
ZNX	-0.38**	-0.60**	0.21	-0.22**
ΑΠΕ	-0.23**	-0.39	0.23	0.16
Μέση συνολική κατανάλωση	0.53**	0.19**	-0.34*	-0.22**

Οι στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις σημειώνονται με ** σε στάθμη σημαντικότητας 0.01 και με * σε στάθμη σημαντικότητας 0.05 (μδ: μη διαθέσιμο).

Εξετάζοντας τις βαθμομέρες θέρμανσης (πίνακας 4) σε σχέση με τις καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση φαίνεται ότι υπάρχει μία συσχέτιση μεταξύ τους με εξαίρεση τις μονοκατοικίες και τα δημόσια κτίρια στη Ζώνη Α. Στο Ηράκλειο, στα κτίρια αυτά, παρατηρούνται μεγαλύτερες καταναλώσεις σε σχέση με τα κτίρια της Ζώνης Β. Αυτό στις μονοκατοικίες οφείλεται πιθανότατα στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση, για την οποία ο συντελεστής μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια είναι σχεδόν τριπλάσιος σε σχέση με υγρά ή αέρια καύσιμα. Για τα δημόσια κτίρια, η μεγαλύτερη κατανάλωση πιθανόν να οφείλεται στην χειρότερη θερμομονωτική κατάσταση των κτιρίων σε σχέση με τα κτίρια της Ζώνης Β ή και στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Πάντως οι αναλογίες των καταναλώσεων από ζώνη σε ζώνη δεν είναι ίδιες με τις αναλογίες των τιμών βαθμομερών, ιδιαίτερα για τις μονοκατοικίες και τα δημόσια κτίρια στα οποία οι αυξήσεις στις καταναλώσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από την αύξηση των βαθμομερών.

Πίνακας 4: Βαθμομέρες θέρμανσης και μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία κτιρίου (σε kWh/m²) και ανά Π.Ε. για την περίοδο 2011-16.

Π.Ε.	Βαθμομέρες θέρμανσης (18°C)	Κατανάλωση ενέργειας Μονοκατοικίες	Κατανάλωση ενέργειας Πολυκατοικίες	Κατανάλωση ενέργειας Δημόσια κτίρια
Ηράκλειο	702	204.2	125.3	74.1
Αθήνα	1152	170.4	134.7	65.9
Θεσσαλονίκη	1677	304.2	201.2	167.7
Φλώρινα	1926	489.3	292.5	224.2

Εξετάζοντας τις βαθμομέρες ψύξης (πίνακας 5) σε σχέση με τις καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη φαίνεται ότι υπάρχει μία συσχέτιση μεταξύ τους μόνο για τα κτίρια πολυκατοικιών, ενώ στα κτίρια μονοκατοικιών παρατηρείται μία συσχέτιση μόνο για τις Ζώνες Β, Γ και Δ. Ίσως γιατί οι βαθμομέρες ψύξης (και αντίστοιχα η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα) δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που διαμορφώνει το ψυκτικό φορτίο, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία και τα εσωτερικά θερμικά κέρδη συντελούν σημαντικά στην κατανάλωση ενέργειας για ψύξη. Έτσι, στο Ηράκλειο, παρατηρούνται μεγαλύτερες καταναλώσεις σε σχέση με τα κτίρια μονοκατοικιών και τα δημόσια κτίρια της Ζώνης Β, το οποίο είναι και αναμενόμενο. Επίσης τα δημόσια κτίρια της Ζώνης Γ εμφανίζουν μεγαλύτερη κατανάλωση σε σχέση με τα κτίρια της Ζώνης Β. Η εξήγηση στην περίπτωση αυτή πιθανόν να είναι η χειρότερη θερμομονωτική κατάσταση των κτιρίων σε σχέση με τα κτίρια της Ζώνης Β ή και στη χρήση περισσότερο ενεργοβόρων συστημάτων κλιματισμού. Πάντως και εδώ οι αναλογίες των καταναλώσεων από ζώνη σε ζώνη δεν είναι ίδιες με τις αναλογίες των τιμών βαθμομερών, ιδιαίτερα για τα κτίρια της Ζώνης Δ, γεγονός που όπως αναφέρθηκε οφείλεται στο ότι οι βαθμομέρες ψύξης δεν δίνουν ακριβή εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη.

Πίνακας 5: Βαθμομέρες ψύξης και μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία κτιρίου (σε kWh/m²) και ανά Π.Ε. για την περίοδο 2011-16.

Π.Ε.	Βαθμομέρες ψύξης (24°C)	Κατανάλωση ενέργειας Μονοκατοικίες	Κατανάλωση ενέργειας Πολυκατοικίες	Κατανάλωση ενέργειας Δημόσια κτίρια
Ηράκλειο	115	57.8	35.9	128.9
Αθήνα	226	48.2	42.5	86.4
Θεσσαλονίκη	135	32.6	25.2	99.4
Φλώρινα	40	15.9	12.2	41.1

Οι βορειότερες περιοχές (Π.Ε. Θεσσαλονίκης και Φλώρινας) εμφανίζουν περισσότερες ανάγκες και συνεπώς καταναλώνουν εντατικά περισσότερη ενέργεια, ειδικά για θέρμανση (η χρήση με τις μέγιστες τιμές) και ΖΝΧ, και στις δύο κατηγορίες κτιρίων, ενώ την ίδια στιγμή οι νότιες περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερη κατανάλωση για ψύξη, αλλά και χρήσεις ΑΠΕ/ΣΗΘ. Η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας αποδεικνύεται σημαντικά μεγαλύτερη στις βόρειες κλιματικές ζώνες (εικόνα 6), στα οικιακά κτίρια και ειδικότερα στις μονοκατοικίες. Στην ανάλυση των δεδομένων σε ετήσια κλίμακα, είναι χαρακτηριστική η αυξητική τάση κατανάλωσης ρεύματος για φωτισμό αλλά και η ελαφρώς αυξημένη χρήση ΑΠΕ/ΣΗΘ. Στην εικόνα 6 παράλληλα απεικονίζεται ευκρινώς οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές της κατανάλωσης, αλλά και οι κατά περίπτωση ακραίες τιμές ανά Π.Ε.

Συμπερασματικά, η ανάλυση καταδεικνύει πως η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας παρουσιάζει μια χαρακτηριστική κατανομή για δημόσια και ιδιωτικά κτίρια που διαφοροποιείται σε συνάρτηση με τη γεωγραφική θέση και την κλιματική ζώνη αναφοράς. Σε μια αρχική προσπάθεια τυποποίησης της συμπεριφοράς της μέσης ετήσιας κατανάλωσης διαπιστώθηκε πως τα κτίρια κατοικιών είναι ευκολότερο να περιγραφούν με μια σχέση γραμμικής παλινδρόμησης με ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης. Τα εξαγόμενα στοιχεία και οι έλεγχοι συμβάλλουν στην καταγραφή και δημιουργία μιας πηγής δεδομένων βάσει της οποίας μελλοντικά μπορούν να αξιολογηθούν τα εφαρμοζόμενα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας. Έμμεσα δηλαδή θα υποστηρίξει τη διάδοση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και μέτρων σε οργανισμούς, δημόσιους φορείς και αστικά ιδιωτικά κτίρια. Εμπόδια όπως η έλλειψη πληροφόρησης, στοιχείων είναι δυνατό να παρακαμφθούν, ενώ θα διευκολυνθεί ο καθορισμός των προτεραιοτήτων στους φορείς στρατηγικού σχεδιασμού, ο εξορθολογισμός των προγραμμάτων στήριξης της ενεργειακής πολιτικής σε διαφορετικά επίπεδα: από την κατανόηση και βελτιστοποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού έως και την τελική χρήση της ενέργειας και την καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας. Η ανάλυση και ανίχνευση των χαρακτηριστικών απόδοσης της υπό εξέταση περιοχής, συμπεριλαμβανομένης της μορφολογίας και των συνδυασμών της τελικής χρήσης της ενέργειας θεωρούνται κρίσιμα σημεία διερεύνησης σε αυτή την κατεύθυνση [17]. Επιπλέον, στο σχεδιασμό των ενεργειακών συστημάτων των κτιρίων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως οι προβλέψεις των ενδεχόμενων αναγκών σε ενέργεια 18, 19] και οι τιμολογιακές προοπτικές, δεδομένου ότι σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat για το 2016, η Ελλάδα μαζί με τη Ρουμανία και την Βουλγαρία αποτελούν τις ευρωπαϊκές χώρες που έχουν πληγεί περισσότερο από την οικονομική, υλική και κοινωνική κρίση, γεγονός που αποτυπώνεται και ως αδυναμία ικανοποιητικής θέρμανσης των κατοικιών [20].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τρέχουσα ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας έχει αξιοσημείωτες στατιστικά διαφορές μεταξύ των βόρειων και νότιων περιοχών, δηλαδή μεταξύ των διαφορετικών κλιματικών ζωνών στην Ελλάδα. Όπως οι Reckien et al. [21] αναφέρουν, υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις όσον αφορά στις αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και την προσαρμογή των αστικών κέντρων της Ευρώπης, μια παραλλαγή που είναι ιδιαίτερα αισθητή αναλογικά με το μέγεθος των πόλεων και το γεωγραφικό προσανατολισμό τους.

Η αρχική καταγραφή και κατ' επέκταση οι διαπιστώσεις, που θα πρέπει μελλοντικά να περιλάβουν και τις υπόλοιπες Π.Ε., είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την αποτύπωση της τρέχουσας εικόνας της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων στην Ελλάδα και θα αποτελέσει τη βάση για την αποτίμηση και αξιολόγηση των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας που εφαρμόζονται σταδιακά τόσο στο κατασκευαστικό επίπεδο, όσο και στη χρήση των κτιρίων. Η εφαρμογή των οδηγιών της Ε.Ε. στην

κατεύθυνση των κτιρίων μηδενικής κατανάλωσης, αλλά και η υιοθέτηση αντίστοιχων στρατηγικών μέτρων από τους χρήστες των κτιρίων θα πρέπει να αποτυπωθεί σε βάθος χρόνου και στις ενεργειακές επιθεωρήσεις που θα λαμβάνουν χώρα τα επόμενα χρόνια.

Συνεπώς, η εφαρμογή κατάλληλων ενεργειακών πολιτικών και βελτιωμένων μέτρων ενεργειακής απόδοσης σε εθνικό επίπεδο, θα μπορεί να αξιολογηθεί σε ένα βαθμό για την ουσιαστική συμβολή τους στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Κατά αυτό τον τρόπο, οι αρμόδιοι φορείς θα έχουν τη δυνατότητα να επικεντρώνονται στις απαραίτητες και πλέον κατάλληλες πολιτικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών CO₂ και ανάσχεσης/προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή [22]. Οι διαθέσιμες τεχνολογικά προηγμένες λύσεις έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν εκείνα τα χρήσιμα εργαλεία και να επιτύχουν την ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, επιτρέποντας την έξυπνη διαχείριση συσκευών που διασφαλίζουν αξιολογη εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η ενεργειακή φτώχεια με περισσότερο επικεντρωμένα μέτρα. Ένα μείγμα παρεμβάσεων σε διαφορετικούς τομείς και επίπεδα, όπως για παράδειγμα η βελτίωση ή επαναπροσδιορισμός των προτύπων εξοικονόμησης ενέργειας σε οικιακά κτίρια, η επανεξέταση τιμολογιακών πολιτικών, τα οικονομικά-φορολογικά κίνητρα, ο κατάλληλος σχεδιασμός της αστικής δόμησης, μπορούν να συνεισφέρουν στην αποτελεσματική επίτευξη στόχων, στρατηγικών ή οικονομικών, σε τοπική, αστική ή περιφερειακή κλίμακα [22].

Όπως υποστηρίζει ο Helm [23], η αποκεντροποίηση των ενεργειακών συστημάτων πρέπει να αναγνωριστεί ως αναγκαιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο και δεδομένου ότι οι σημερινές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι επαρκείς, είναι προφανές ότι θα πρέπει να αναπτυχθούν μελλοντικές λύσεις για την ανανεώσιμη ενέργεια για την οικοδόμηση της ανθεκτικότητας των πόλεων. Το συγκεκριμένο πεδίο είναι για την Ευρώπη μία ενεργειακή πρόκληση και έχοντας το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα πρέπει να εστιάσει στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών.

Ωστόσο, υπάρχει και ο αντίλογος πως η κλιματική αλλαγή και η ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από τις αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον, την ενέργεια και τις υποδομές, είναι δυνατό να επηρεάσει θετικά την ανθρώπινη προσωπικότητα και συμπεριφορά, ενισχύοντας την κοινωνικότητα, την ενσυνείδηση, τη συναισθηματική σταθερότητα και την ανάπτυξη της προσωπικότητας [24].

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IEA- International Energy Agency, 2016, Energy Efficiency Market Report 2016, OECD/IEA, Paris.
- [2] Cartalis, C., Synodinou, A., Proedrou, M., Tsangrassoulis, A., and Santamouris, M., 2001, "Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region", *Energy Conversion and Management*, 42(14), pp. 1647–1656.
- [3] Kapsomenakis, J., Kolokotsa, D., Nikolaou, T., Santamouris, M., and Zerefos, S.C., 2013, "Forty years increase of the air ambient temperature in Greece: the impact on buildings", *Energy Conversion and Management*, 74, pp. 353–365.
- [4] Asimakopoulos, D.A., Santamouris, M., Farrou, I., Laskari, M., Saliari, M., Zanis, G., Giannakidis, G., Tigas, K., Kapsomenakis, J., Douvis, C., Zerefos, S.C., Antonakaki, T., and Giannakopoulos, C., 2012, "Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century", *Energy Building*, 49, pp. 488–498.
- [5] Santamouris, M., 2016, "Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change", *Solar energy*, 128, pp. 61–94.
- [6] Papakostas, K., Mavromatis, T., and Kyriakis, N., 2010, "Impact of the ambient temperature rise on the energy consumption for heating and cooling in residential buildings of Greece", *Renewable Energy*, 35, pp. 1376–1379.
- [7] IEA - International Energy Agency, 2015, Energy and Climate Change, World Energy Outlook Special Report, OECD/IEA, Paris.
- [8] European Commission, 2016, Clean Energy for Europe, COM/2016/860 final.

- [9] European Commission, 2014, Assessment of the progress made by Member States in 2014 towards the national energy efficiency targets for 2020 and towards the implementation of the Energy Efficiency Directive 2012/27/EU as required by Article 24 (3) of the Energy Efficiency Directive 2012/27/EU, COM/2017/056 final.
- [10] Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., and Soussana, J.F., 2014, Europe, In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y. O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press (2014) Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1267-1326.
- [11] Slini, T., and Papakostas, K., 2016, "30 Years Air Temperature Data Analysis in Athens and Thessaloniki, Greece", *Energy, Transportation and Global Warming, Part of the series Green Energy and Technology*, Springer International Publishing, pp. 21-33.
- [12] Mirasdegis, S., Sarafidis, Y., Georgopoulou, E., Kotroni, V., Lagourvardos, K., and Lalas, C.P., 2007, "Modeling framework for estimating impacts of climate change on electricity demand at regional level: Case of Greece", *Energy Convers. Management*, 48(5), pp. 1737–1750.
- [13] URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- [14] Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., and Kolokotsa, D., 2015, "On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review", *Energy and Buildings*, 98, pp. 119-124.
- [15] CRES - Centre for Renewable Energy Sources, 2014, *National Energy Efficiency Action Plan*, Athens, December.
- [16] URL: www.ypeka.gr
- [17] Kyllili, A., and Fokaides, P.A., 2015, "European smart cities: The role of zero energy buildings", *Sustainable Cities and Society*, 15, pp. 86-95.
- [18] Slini, T., Giama, E., and Papadopoulos, A.M., 2015, "The impact of economic recession on domestic energy consumption", *International Journal of Sustainable Energy*, 34(3-4), pp. 259-270.
- [19] Slini, T., Giama, E., and Papadopoulos, A.M., 2014, "On the elasticity of residential energy consumption", *IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, Chania, Greece, pp. 349-354.
- [20] Eurostat, *Material and social deprivation*, 12/12/2017, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20171212-1?inheritRedirect=true>
- [21] Reckien, D., Flacke, J., Dawson, J.R., Heidrich, O., Olazabal, M., Foley A., Hamann, J. J.-P., Orru, H., Salvia, M., De Gregorio Hurtado, S., Geneletti, D., and Pietrapertosa, F., 2014, "Climate change response in Europe: what's the reality? Analysis of adaptation and mitigation plans from 200 urban areas in 11 countries", *Climatic Change*, 122(1), pp. 331-340.
- [22] Barbeta, G.P., Canino, P., and Cima, S., 2015, "The impact of energy audits on energy efficiency investment of public owners. Evidence from Italy", *Energy*, 93(1), pp. 1199-1209.
- [23] Landis, J.D., Hsu, D., and Guerra, E., 2017, "Intersecting Residential and Transportation CO₂ Emissions: Metropolitan Climate Change Programs in the Age of Trump", *Journal of Planning Education and Research*, pp. 1-21, <https://doi.org/10.1177/0739456X17729438>.
- [24] Helm, D., 2014, "The European framework for energy and climate policies", *Energy Policy*, 64, pp. 29-35.
- [25] Wei, W., Lu, J.G., Galinsky, A.D., Wu, H., Gosling, S.D., Rentfrow, P.J., Yuan, W., Zhang, Q., Guo, Y., Zhang, M., Gui, W., Guo, X.-Y., Potter, J., Wang, J., Li, B., Li, X., Han, Y.-M., Lv, M., Guo, X.-Q., Choe, Y., Lin, W., Yu, K., Bai, Q., Shang, Z., Han, Y., and Wang, L., 2017, "Regional ambient temperature is associated with human personality", *Nature Human Behaviour*, 1, pp. 890–895.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ

Καλλιόπη Γ. Δρούτσα^{1*}, Σίμων Κοντογιαννίδης¹, Κων/νος Α. Μπαλαράς¹,
Έλενα Γ. Δασκαλάκη¹, Αθανάσιος Α. Αργυρίου²

¹ Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης
Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών,

² Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
e-mail: pdroutsa@noa.gr

* Ι. Μεταξά & Βασ. Παύλου 15236 Π. Πεντέλη; Τηλ.: 210 8109144; E-mail:
pdroutsa@noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια για την ενεργειακή χαρτογράφηση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την ανάλυση 18.491 Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ), τα οποία περιλαμβάνονται στην επίσημη βάση των ενεργειακών πιστοποιητικών της πλατφόρμας buildingcert. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή δεικτών για την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων τριτογενούς τομέα στην υφιστάμενη κατάσταση, καθώς και συμπερασμάτων για την βαρύτητα των διαφορών χρήσεων στο ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Το δείγμα των κτιρίων ακολουθεί το μοντέλο του κτιριακού μας αποθέματος, καθώς το 46% έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, το 33% μεταξύ 1981-2000, το 17% μεταξύ 2001-2010 και μόλις το 4% μετά το 2010. Η ενεργειακή τους συμπεριφορά χαρακτηρίζεται μέτρια, καθώς το 30% των κτιρίων κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Δ, ενώ μόλις το 6% κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Β ή καλύτερη. Η μέση υπολογιζόμενη πρωτογενής ενέργεια για τις διάφορες κατηγορίες κτιρίων κυμαίνεται από 185,9 kWh/m² (κτίρια Εκπαίδευσης) μέχρι 806,7 kWh/m² (κτίρια Συνάθροισης κοινού). Αντίστοιχα οι εκπομπές CO₂ κυμαίνεται από 54.8 kgCO₂/m² μέχρι 248.1 kgCO₂/m². Γενικά στα κτίρια του τριτογενούς τομέα ο φωτισμός είναι η πλέον ενεργοβόρα τελική χρήση (34%), ακολουθούμενη από την ψύξη χώρων (32%), την θέρμανση χώρων (28%) και το ΖΝΧ(6%).

Λέξεις Κλειδιά: Τριτογενής τομέας, Ενεργειακή συμπεριφορά, Πρωτογενής ενέργεια, Ενεργειακή κατάταξη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κτιριακός τομέας έχει έντονο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα εξαιτίας της χρήσης πρωτογενών υλών, της κατανάλωσης φυσικών πόρων και της παραγωγής ρύπων και αποβλήτων. Σαν αποτέλεσμα, η συμβολή του στην επίτευξη των μέσο- και μακρο-πρόθεσμων στόχων και στρατηγικών που σχετίζονται με την ενέργεια, τις δεσμεύσεις και τα κίνητρα στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής, είναι καθοριστική, οδηγώντας όλες τις προσπάθειες προς κτίρια υψηλής απόδοσης.

Διάφορες Ευρωπαϊκές Οδηγίες έχουν εκδοθεί την τελευταία 15ετία, με έμφαση όχι μόνο στα νέα κτίρια, αλλά και στην βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των υφιστάμενων κτιρίων. Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα αποτελούν περίπου το 25% του Ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος. Παρόλα αυτά, συμβάλουν σημαντικά στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιριακού τομέα εξαιτίας των ειδικών απαιτήσεων και του μεγέθους τους. Εκτιμάται ότι τα κτίρια του τριτογενούς τομέα στην Ευρώπη καταλαμβάνουν περίπου 25 δις m² επιφάνεια [1]. Η συνολική κατανάλωση τελικής ενέργειας το 2014 έφτασε τα 141,2 εκ. τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (MTIP), με μέση τιμή 280 kWh/m² (περίπου 40% υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή για τα κτίρια κατοικιών), ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν, αυξήθηκε κατά 74% τα τελευταία 20 χρόνια [2].

Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή κτιρίων από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία το 2011 [3], υπάρχουν περίπου 785.500 κτίρια του τριτογενούς τομέα με αποκλειστική χρήση, που αποτελούν το 21% του ελληνικού κτιριακού αποθέματος. Η συνολική επιφάνεια δαπέδου είναι περίπου 159 εκ. m², με την πλειοψηφία να είναι κτίρια σχολείων (33,4%), καταστήματα (22,1%), γραφεία (20,0%), ξενοδοχεία και εστιατόρια (19,9%), αθλητικές εγκαταστάσεις (3,0%), νοσοκομεία (1,5%), και άλλες χρήσεις [4]. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δημοσιευμένα στοιχεία για το 2014, η τελική κατανάλωση ενέργειας στα ελληνικά κτίρια είναι περίπου 5,6 MTIP με το 32% να αφορά σε κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια του τριτογενούς τομέα. Στην Ελλάδα, και σε μεγάλο βαθμό στην Ευρώπη, δεν υπάρχουν επικαιροποιημένα αναλυτικά δεδομένα για τις κατανalώσεις των κτιρίων του τριτογενούς τομέα, ούτε αντίστοιχα δεδομένα για την αποτελεσματικότητα των διαφόρων επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια για την ενεργειακή χαρτογράφηση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την ανάλυση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται από την επίσημη βάση των ενεργειακών πιστοποιητικών της πλατφόρμας buildingcert και περιλαμβάνουν τα γενικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (π.χ. χρήση, χρονική περίοδος κατασκευής, νομός, συνολική και θερμαινόμενη επιφάνεια), καθώς επίσης και υπολογιζόμενα μεγέθη (π.χ. ενεργειακή κλάση, πρωτογενής ενέργεια και εκπομπές CO₂). Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή δεικτών για την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων τριτογενούς τομέα στην υφιστάμενη κατάσταση, καθώς και συμπερασμάτων για την βαρύτητα των διαφόρων χρήσεων στο ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Οι ενεργειακοί δείκτες επίδοσης, όπως η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας για διάφορες κατηγορίες κτιρίων και γεωγραφικές περιοχές, πρακτικά χρησιμοποιούνται από όλες τις μεθοδολογίες αξιολόγησης της ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων και συστήματα περιβαλλοντικής πιστοποίησης κτιρίων (π.χ. BREEAM, LEED) ή δημόσια συστήματα αξιολόγησης όπως για παράδειγμα το Eco-Quartier, Protocollo ITACA, QDM [5]. Οι υφιστάμενες μεθοδολογίες και τα συστήματα αξιολόγησης περιλαμβάνουν διάφορες θεματικές ενότητες για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός κτιρίου ή μιας αστικής περιοχής (πχ Ενέργεια & Εκπομπές, Πόροι & Περιβάλλον, Οικονομία, Κοινωνικές Πτυχές, Αστικές Υποδομές). Διαφορετικές κατηγορίες αναλύουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε θεματικής ενότητας με την χρήση συγκεκριμένων κριτηρίων και δεικτών. Για παράδειγμα, για την ενότητα «Ενέργεια & Εκπομπές», την κατηγορία «Συμβατικές Πηγές Ενέργειας» και το κριτήριο: «Πρωτογενής Ενέργεια για Θέρμανση» συνήθως χρησιμοποιείται ο δείκτης «kWh/m²». Το πρώτο βήμα είναι η ποσοτικοποίηση των επιδόσεων του κτιρίου δηλαδή ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής που σχετίζεται με την ενεργειακή επίδοση του κτιρίου για το συγκεκριμένο κριτήριο (πχ kWh/m² ή kWh/τύπο κτιρίου). Για να είναι δυνατή η σύγκριση των δεικτών από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές ή χώρες, οι τιμές τους μετατρέπονται σε αδιάστατες παραμέτρους και μετασχηματίζονται σε μια νέα κοινή κλίμακα αναφοράς, που ονομάζεται διάστημα κανονικοποίησης (σε μια κοινή κλίμακα βαθμολόγησης). Η εξομάλυνση συνίσταται στην αντιστοίχιση μιας κοινής βαθμολογίας στην τιμή του δείκτη προσδιορίζοντας τα ανώτερα και κατώτερα όρια τιμών αναφοράς (ελάχιστες αποδεκτές επιδόσεις και βέλτιστες πρακτικές) σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο.

Μια τέτοια προσπάθεια βρίσκεται σε εξέλιξη στα πλαίσια του προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας στη Μεσόγειο (Interreg MED). Το έργο CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις της Μεσογείου έχει σαν στόχο την ανάπτυξη μιας νέας διαδικασίας λήψης αποφάσεων που συνδυάζει διάφορους δείκτες επίδοσης για να υποστηρίξει τους χρήστες στην αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των δράσεων μεγάλης κλίμακας και να διευκολύνει την αξιολόγηση αναπτυξιακών σχεδίων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων του τριτογενή τομέα και βιώσιμης τοπικής αστικής ανάπτυξης. Στα πλαίσια της πιλοτικής εφαρμογής σε Ελληνικά κτίρια του τριτογενή τομέα και για τον προσδιορισμό των ορίων αναφοράς για την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων της ενεργειακής τους επίδοσης, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από τα ΠΕΑ τα οποία αναλύονται για διαφορετικές περιοχές και κατηγορίες κτιρίων.

Η χωρική κατανομή των διαθέσιμων δεδομένων και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που παρουσιάζονται στην εργασία βασίζεται στην κοινή ονοματολογία των εδαφικών στατιστικών μονάδων (Nomenclature of Territorial Units for Statistics, NUTS) που είναι το πρότυπο γεωκωδικών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κωδικοποίηση της διοικητικής διαίρεσης για στατιστικούς λόγους. Η διοικητική διαίρεση της Ελλάδας σύμφωνα με τα πρώτα τρία επίπεδα NUTS παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Σύμφωνα με το δεύτερο επίπεδο NUTS, η ελληνική επικράτεια χωρίζεται σε 13 περιφέρειες, από τις οποίες μόλις τρεις ταυτίζονται εδαφικά με διαμέρισμα: Ηπείρου, Θεσσαλίας και Κρήτης.

Πίνακας 1: Κτίρια αποκλειστικής χρήσης τριτογενούς τομέα, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, εκτός από Εκκλησίες/Μοναστήρια, Εργοστάσια/Εργαστήρια και Σταθμούς στάθμευσης αυτοκινήτων

NUTS 1 Γεωγραφική Ομάδα	NUTS 2 Περιφέρειες (NUTS 3 Νομοί)	Κτίρια
Βόρεια Ελλάδα	Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (Δράμα, Έβρος, Καβάλα, Θάσος, Ξάνθη, Ροδόπη)	71.012
	Κεντρική Μακεδονία (Ημαθία, Θεσσαλονίκη, Κιλκίς, Πέλλα, Πιερία, Σέρρες, Χαλκιδική)	116.849
	Δυτική Μακεδονία (Γρεβενά, Καστοριά, Κοζάνη, Φλώρινα)	39.622
	Θεσσαλία (Καρδίτσα, Λάρισα, Μαγνησία, Σποράδες, Τρίκαλα)	72.533
Κεντρική Ελλάδα	Ήπειρος (Αρτα, Θεσπρωτία, Ιωάννινα, Πρέβεζα)	35.271
	Δυτική Ελλάδα (Αιτωλοακαρνανία, Αχαΐα, Ηλεία)	45.136
	Ιόνια Νησιά (Ζάκυνθος, Ιθάκη, Κέρκυρα, Κεφαλληνία, Λευκάδα)	25.670
	Στερεά Ελλάδα (Βοιωτία, Εύβοια, Ευρυτανία, Φθιώπδα, Φωκίδα)	43.156
	Πελοπόννησος (Αργολίδα, Αρκαδία, Κορινθία, Λακωνία, Μεσσηνία)	55.764
Αττική	Αττική (Κεντρικός Τομέας Αθηνών, Βόρειος Τομέας Αθηνών, Δυτικός Τομέας Αθηνών, Νότιος Τομέας Αθηνών, Ανατολική Αττική, Δυτική Αττική, Πειραιάς, Νησιά Αττικής)	59.922
Νησιά Αιγαίου και Κρήτη	Βόρειο Αιγαίο (Ικαρία, Λέσβος, Λήμνος, Σάμος, Χίος)	28.602
	Νότιο Αιγαίο (Άνδρος, Θήρα, Κάλυμνος, Κάρπαθος, Κέα-Κύθνος, Κως, Μήλος, Μύκονος, Νάξος, Πάρος, Ρόδος, Σύρος, Τήνος)	43.483
	Κρήτη (Ηράκλειο, Λασιθί, Ρέθυμνο, Χανιά)	48.295

2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μέχρι τον Δεκέμβριο του 2016 είχαν εκδοθεί περίπου 960.000 πιστοποιητικά από τα οποία 17% αφορούν κτίρια του τριτογενούς τομέα (ολόκληρα κτίρια ή κτιριακές μονάδες). Αρχικά έγινε ένας βασικός ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων. Στην ανάλυση των δεδομένων δεν συμπεριλήφθηκαν τα πιστοποιητικά που εκδόθηκαν για κτίρια τα οποία δεν υπόκεινται στην έκδοση πιστοποιητικού (λόγω χρήσης ή συνολικής επιφάνειας); εκδόθηκαν για το ίδιο κτίριο, κατά την δεύτερη φάση επιδοτούμενων προγραμμάτων; εκδόθηκαν από επιθεωρητές στους οποίους είχαν επιβληθεί κυρώσεις; δεν ήταν πλήρως συμπληρωμένα; δεν είχαν υποβληθεί οριστικά; περιείχαν αμφισβητούμενα δεδομένα (π.χ. αρνητικές τιμές, θερμαινόμενη επιφάνεια μεγαλύτερη από συνολική ή μικρότερη από 20% της συνολικής, μηδενικές εκπομπές CO₂ για καύσιμο εκτός βιομάζας, κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για χρήσεις με μηδενική απαίτηση βάσει ΚΕΝΑΚ); περιείχαν ακραίες τιμές (π.χ. πρωτογενής ενέργεια μικρότερη από 5 kWh/m² και μεγαλύτερη από 8.000

kWh/m²). Σαν αποτέλεσμα, τα πιστοποιητικά που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση που ακολουθεί ήταν περίπου 120.000 EPCs δηλαδή το 75% της αρχικής βάσης.

Η συντριπτική πλειοψηφία των πιστοποιητικών αφορούν κτιριακές μονάδες, ενώ μόνο 18.491 πιστοποιητικά αφορούν ολόκληρα κτίρια, τα οποία αποτελούν περίπου το 17% των πιστοποιητικών για τον τριτογενή τομέα. Η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει μόνο στα ολόκληρα κτίρια, καθώς θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά όσον αφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τις Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ, καθορίζονται συνολικά 60 διαφορετικές χρήσεις κτιρίων, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 30 «τύπους» κτιρίων, οι οποίοι ενσωματώνουν διάφορες χρήσεις με κοινές παραδοχές και τυπικές τιμές για τους υπολογισμούς και τελικά σε 7 βασικές κατηγορίες κτιρίων (I-VII) (Πίνακας 2).

Η ανάλυση των δεδομένων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται ανά:

- περιφέρεια σύμφωνα με το δεύτερο επίπεδο NUTS της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ελλάδα
- κατηγορία κτιρίου σύμφωνα με τις Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ
- περίοδο κατασκευής (T1: προ-1980; T2: 1981-2000; T3: 2001-2010; T4: μετά-2010)

Πίνακας 2: Ολόκληρα κτίρια τριτογενούς τομέα από την βάση των ΠΕΑ ανά κατηγορία κτιρίου.

Κατηγορία Κτιρίων (Χρήση Κτιρίων)	Κτίρια
I. Προσωρινής διαμονής (Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας, Ξενοδοχείο θερινής λειτουργίας, Ξενοδοχείο χειμερινής λειτουργίας, Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας, Ξενώνας θερινής λειτουργίας, Ξενώνας χειμερινής λειτουργίας, Οικοτροφείο/ κοιτώνας)	3.920
II. Συνάθροισης κοινού (Εστιατόριο, Ζαχαροπλαστείο/καφενείο, Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης/μουσική σκηνή, Θέατρο/κινηματογράφος, Χώρος εκθέσεων/μουσείο, Χώρος συναυλιών, Χώρος συνεδρίων/αμφιθέατρο/αίθουσα δικαστηρίων, Τράπεζα, Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, Κλειστό γυμναστήριο/κλειστό κολυμβητήριο)	4.470
III. Εκπαίδευσης (Νηπιαγωγείο, Πρωτοβάθμια εκπαίδευση/δευτεροβάθμια εκπαίδευση, Τριτοβάθμια εκπαίδευση/αίθουσα διδασκαλίας, Φροντιστήριο/ωδείο)	979
IV. Υγείας και Κοινωνικής Πρόνοιας (Νοσοκομείο/κλινική, Αγροτικό ιατρείο/υγειονομικός σταθμός/κέντρο υγείας/ιατρείο, Ψυχιατρείο/ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες/ίδρυμα χρονίως πασχόντων/οίκος ευημερίας/βρεφκομείο, Βρεφικός σταθμός/παιδικός σταθμός)	489
V. Σωφρονισμού (Κρατητήριο, Αναμορφωτήριο, Φυλακή, Αστυνομική διεύθυνση)	10
VI. Εμπορίου (Εμπορικό κέντρο/αγορά και υπεραγορά, Κατάστημα/φαρμακείο, Ινστιτούτο γυμναστικής, Κουρείο/κομμωτήριο)	6.929
VII. Γραφείων (Γραφείο, Βιβλιοθήκη)	1.694

Το δείγμα των κτιρίων ακολουθεί το μοντέλο του κτιριακού μας αποθέματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας [3], καθώς το 46% έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, το 33% μεταξύ 1981-2000, το 17% μεταξύ 2001-2010 και μόλις το 4% μετά το 2010. Τα επιθεωρούμενα κτίρια βρίσκονται σε 61 διαφορετικές πόλεις σε όλη την Ελλάδα (Πίνακας 3) σε μια αντιπροσωπευτική κατανομή, με το 29% να βρίσκονται στην Βόρεια Ελλάδα, 29% στην Κεντρική Ελλάδα, 23% στα Νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη και το 23% στην Αττική.

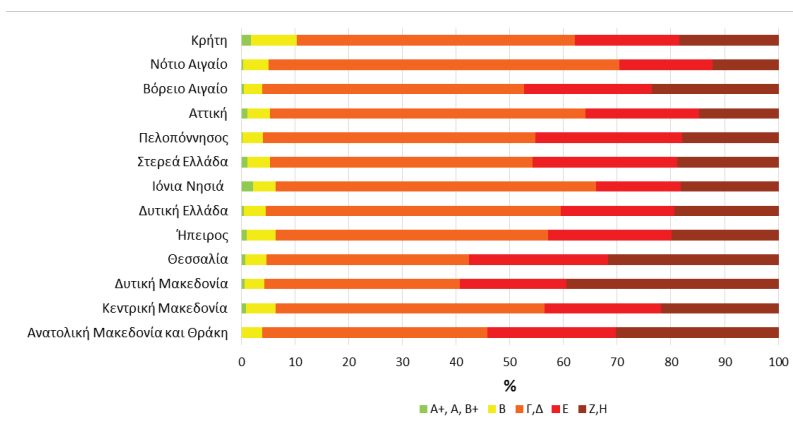
Τα περισσότερα κτίρια στην βάση των ΠΕΑ είναι τα κτίρια Εμπορίου με τα καταστήματα να αντιστοιχούν στο 94% και ακολουθούν τα κτίρια Συνάθροισης κοινού με τα εστιατόρια να αντιστοιχούν στο 42%. Τα κτίρια Εμπορίου είναι η επικρατέστερη κατηγορία σχεδόν σε όλες τις περιφέρειες, με εξαίρεση τα Ιόνια Νησιά και το Νότιο Αιγαίο στα οποία η επικρατέστερη κατηγορία κτιρίων είναι τα Προσωρινής διαμονής και την Ήπειρο στην οποία επικρατέστερη κατηγορία είναι τα κτίρια Συνάθροισης κοινού. Τα κτίρια Σωφρονισμού είναι πολύ λίγα, αντιπροσωπεύουν μόλις το 0.05% των κτιρίων στην βάση των ΠΕΑ, οπότε δεν θα παρουσιάζονται αναλυτικά στα αποτελέσματα.

Πίνακας 3: Ολόκληρα κτίρια τριτογενούς τομέα από την βάση των ΠΕΑ, ανά περιφέρεια.

Περιφέρειες (NUTS 2)	Κτίρια (Τ1%/Τ2%/Τ3%/Τ4%)	% Κτιρίων ανά κατηγορία I/II/III/IV/VI/VII	Συνολική επιφάνεια (m ²)
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	971 (57%/27%/13%/3%)	12%/28%/4%/4%/47%/5%	569.051
Κεντρική Μακεδονία	2481 (45%/34%/17%/4%)	19%/21%/12%/3%/37%/8%	1.861.669
Δυτική Μακεδονία	322 (53%/31%/13%/3%)	6%/34%/12%/4%/38%/6%	190.579
Θεσσαλία	1.402 (53%/30%/14%/3%)	15%/29%/8%/2%/41%/5%	582.265
Ήπειρος	698 (45%/34%/16%/5%)	20%/36%/7%/1%/30%/6%	347.504
Δυτική Ελλάδα	988 (49%/29%/18%/4%)	6%/33%/4%/2%/48%/7%	379.248
Ιόνια Νησιά	1.397 (22%/48%/26%/4%)	61%/18%/0,1%/0,8%/18%/2%	544.574
Στερεά Ελλάδα	848 (49%/31%/15%/5%)	15%/30%/5%/2%/42%/6%	355.519
Πελοπόννησος	1.214 (52%/27%/17%/4%)	19%/30%/4%/2%/37%/8%	518.278
Αττική	3.967 (53%/27%/17%/3%)	4%/21%/5%/5%/43%/22%	3.713.954
Βόρειο Αιγαίο	708 (63%/27%/8%/2%)	18%/32%/2%/1%/41%/6%	151.892
Νότιο Αιγαίο	1.846 (35%/47%/15%/3%)	44%/20%/3%/1%/29%/3%	760.284
Κρήτη	1.649 (39%/35%/21%/5%)	36%/19%/2%/1%/37%/5%	752.325

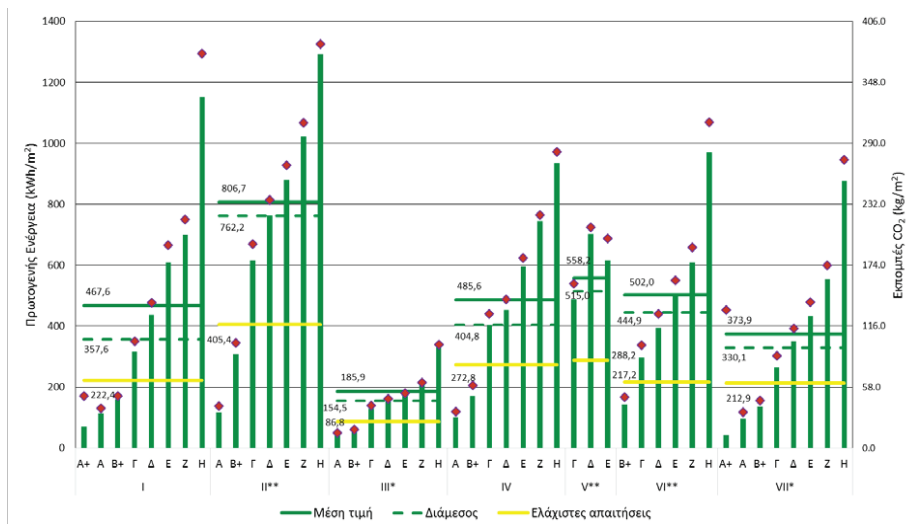
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία των δεδομένων από τα διαθέσιμα ΠΕΑ, επιβεβαιώνει την μέτρια ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων του τριτογενούς τομέα. Περίπου 30% των κτιρίων κατατάσσονται στην ενεργειακή κλάση -Δ, 22% στην -Γ, 22% στην Ε, 20% στην -Ζ και -Η, 5% στην -Β και μόλις 1% στην -Β+ ή καλύτερα. Η κατανομή των κτιρίων στις ενεργειακές κλάσεις είναι παρόμοια και στις δεκατρείς περιφέρειες (Εικόνα 1). Η Ήπειρος και η Θεσσαλία έχουν τα υψηλότερα ποσοστά ενεργειακών κλάσεων -Ζ και -Η, ενώ τα Ιόνια Νησιά και η Κρήτη τα υψηλότερα ποσοστά -Β+ ή καλύτερα. Συγκριτικά, τα κτίρια του οικιακού τομέα παρουσιάζουν χειρότερη ενεργειακή συμπεριφορά, καθώς το 51% κατατάσσονται στις δύο τελευταίες ενεργειακές κλάσεις -Ζ και -Η, ενώ μόλις το 3% στην - Β ή καλύτερα [6]. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται και στην Ισπανία [7] όπου τα κτίρια του τριτογενούς τομέα έχουν ελαφρώς καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά από τις κατοικίες, με 26,4% των κτιρίων να κατατάσσονται στην κλάση -Δ, 22,8% στην -Ε και 19,8% στην -Γ.



Εικόνα 1: Κατανομή των κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση και περιφέρεια

Η υπολογιζόμενη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία κτιρίων και ανά ενεργειακή κλάση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Η μέση τιμή για τις διάφορες κατηγορίες κτιρίων κυμαίνεται από 185,9 kWh/m² (κτίρια Εκπαίδευσης) μέχρι 806,7 kWh/m² (κτίρια Συνάθροισης κοινού). Η διακύμανση είναι σημαντική δεδομένου ότι ορισμένες κατηγορίες και χρήσεις κτιρίων έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις (π.χ. χειρουργεία, μονάδες εντατικής, εσωτερικά κολυμβητήρια, κ.α.). Στις περισσότερες περιπτώσεις, βέβαια, είναι αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη μέση τιμή για τα ολόκληρα κτίρια κατοικιών 340,1 kWh/m².

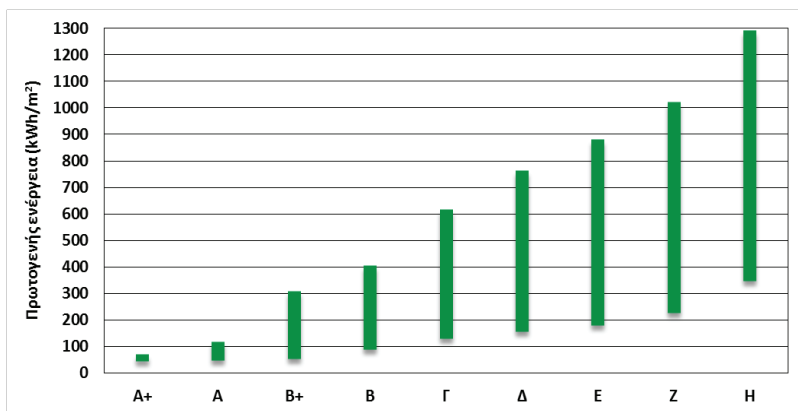


* Όλες οι χρήσεις κτιρίων της κατηγορίας χωρίς ZNX

** Μερικές χρήσεις κτιρίων της κατηγορίας χωρίς ZNX

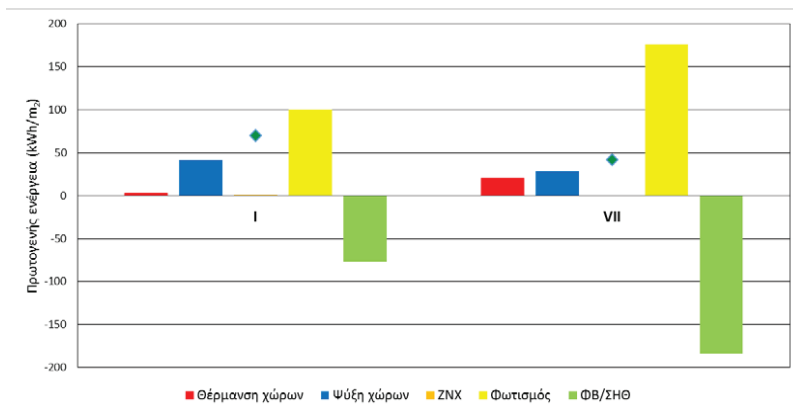
Εικόνα 2: Υπολογιζόμενη μέση τιμή πρωτογενούς ενέργειας ανά ενεργειακή κλάση και κατηγορία κτιρίου. Η ελάχιστη απαίτηση αντιστοιχεί στην πρωτογενή ενέργεια για την ενεργειακή κλάση –B. Οι υπολογιζόμενες εκπομπές CO₂ εμφανίζονται με τον κόκκινο ρόμβο (δευτερεύων άξονας).

Η διακύμανση της υπολογιζόμενης μέσης τιμής για την πρωτογενή ενέργεια ανά ενεργειακή κλάση φαίνεται στην Εικόνα 3. Η μέση τιμή κυμαίνεται από 49,1 kWh/m² για την ενεργειακή κλάση –A+ μέχρι 1007,8 kWh/m² για την ενεργειακή κλάση –H.



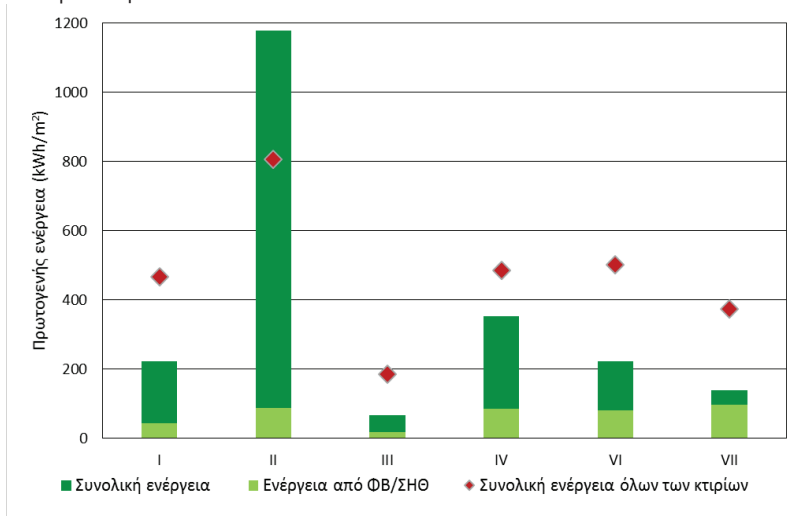
Εικόνα 3: Διακύμανση της υπολογιζόμενης μέσης τιμής πρωτογενούς ενέργειας ανά ενεργειακή κλάση.

Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα που κατατάσσονται στην ενεργειακή κλάση –A+ είναι ελάχιστα, μόλις ένα κτίριο Προσωρινής διαμονής (Ξενοδοχείο – θερινής περιόδου) και τρία κτίρια Γραφείων (Εικόνα 4). Όπως είναι αναμενόμενο, πρόκειται κυρίως για καινούρια κτίρια. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των κτιρίων είναι οι πολύ μικρές καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση/ψύξη και η μεγάλη συνεισφορά ενέργειας από Φωτοβολταϊκά (ΦΒ) ή/και Σύστημα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).



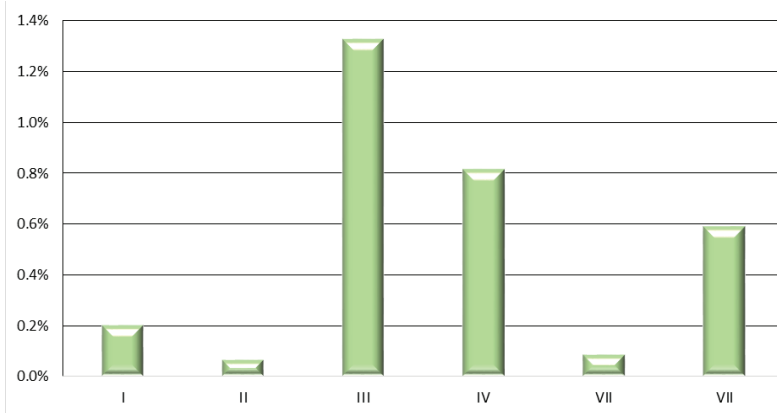
Εικόνα 4: Κατανομή της υπολογιζόμενης μέσης κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση και ανά κατηγορία κτιρίου για τα κτίρια ενεργειακής κλάσης –A+.

Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι για κάθε κατηγορία κτιρίων, τα κτίρια με ΦΒ ή ΣΗΘ έχουν χαμηλότερη υπολογιζόμενη μέση πρωτογενή ενέργεια από την μέση τιμή όλων των κτιρίων της αντίστοιχης κατηγορίας (Εικόνα 5). Εκτός από τα κτίρια Συνάθροισης κοινού (κατηγορία II), και συγκεκριμένα τα κλειστά κολυμβητήρια/γυμναστήρια τα οποία έχουν τις υψηλότερες καταναλώσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια από ΦΒ ή ΣΗΘ είναι πολύ μικρή σε σχέση με την συνολική του κτιρίου.

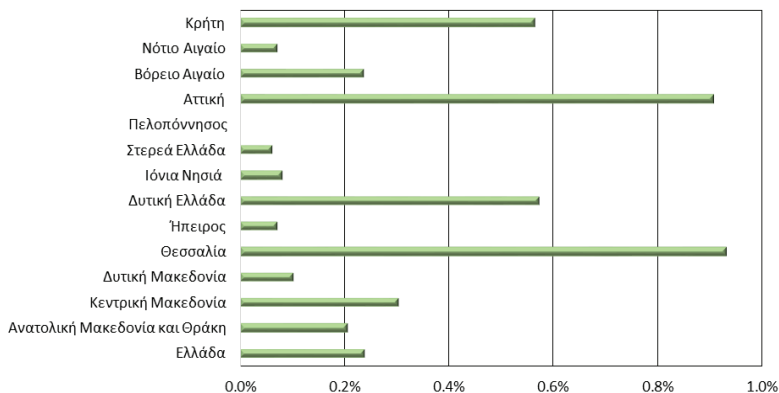


Εικόνα 5. Υπολογιζόμενη μέση πρωτογενής ενέργεια για κτίρια τα οποία έχουν ΦΒ ή ΣΗΘ, ανά κατηγορία.

Παρά την σημαντική συμβολή των ΦΒ και των ΣΗΘ στην βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, η διείσδυση τους στα κτίρια του τριτογενούς τομέα είναι σχεδόν μηδενική. Συγκεκριμένα, μόλις το 0,2% των κτιρίων αξιοποιεί την ενέργεια από ΦΒ ή ΣΗΘ, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανά κατηγορία κτιρίου ή ανά περιφέρεια (Εικόνες 6, 7).



Εικόνα 6. Ποσοστό αξιοποίησης ενέργειας από ΦΒ ή ΣΗΘ ανά κατηγορία κτιρίου



Εικόνα 7. Ποσοστό αξιοποίησης ενέργειας από ΦΒ ή ΣΗΘ ανά περιφέρεια

Σύμφωνα με την ανάλυση των δεδομένων, ο φωτισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε όλες τις κατηγορίες κτιρίων. Γενικά στα κτίρια του τριτογενούς τομέα ο φωτισμός είναι η πλέον ενεργοβόρα τελική χρήση (34%), ακολουθούμενη από την ψύξη χώρων (32%), την θέρμανση χώρων (28%) και το ΖΝΧ(6%). Παρόμοιες αναφορές υπάρχουν και για την Ισπανία [7] για θέρμανση χώρων (38,3%), φωτισμό (37,2%), ψύξη χώρων (13,3%) και ΖΝΧ (11,1%). Η υπολογιζόμενη μέση κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για φωτισμό για τις διάφορες κατηγορίες κτιρίων κυμαίνεται μεταξύ 69,0 – 224,0 kWh/m², για ψύξη χώρων μεταξύ 10,7 – 272,4 kWh/m², για θέρμανση χώρων μεταξύ 60,1 – 253,2 kWh/m² και για ΖΝΧ μεταξύ 1,5 – 98,7 kWh/m². Αναλυτικά η υπολογιζόμενη μέση πρωτογενής ενέργεια για θέρμανση χώρων, ψύξη χώρων και φωτισμό ανά περιφέρεια και κατηγορία κτιρίου παρουσιάζεται στους Πίνακες 4-6. Με έντονη γραμματοσειρά παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές κάθε κατηγορίας, ενώ τα έντονα σκιαγραφημένα πεδία αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες τιμές και προοδευτικά καταλήγουν στα λευκά πεδία που αντιστοιχούν στις μικρότερες τιμές.

Πίνακας 4: Διακύμανση της μέσης υπολογιζόμενης πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση χώρων (kWh/m²) ανά περιφέρεια και κατηγορία κτιρίου.

Περιφέρεια	Κατηγορία κτιρίου					
	I	II	III*	IV	VI**	VII*
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	114,0	366,8	173,2	204,5	247,5	174,0
Κεντρική Μακεδονία	66,9	314,3	131,8	195,0	221,4	150,0
Δυτική Μακεδονία	342,0	493,0	199,9	249,4	339,1	257,4
Θεσσαλία	120,8	352,7	111,3	244,6	228,9	183,9
Ήπειρος	128,6	319,7	131,9	184,3	169,1	127,1
Δυτική Ελλάδα	124,5	222,0	62,9	113,4	107,7	81,8
Ιόνια Νησιά	18,0	211,9	117,6	171,4	102,1	89,7
Στερεά Ελλάδα	148,0	261,0	119,8	161,8	141,8	105,7
Πελοπόννησος	131,1	238,6	96,1	184,1	144,3	127,1
Αττική	118,9	182,3	69,1	147,3	103,5	64,6
Βόρειο Αιγαίο	71,1	257,3	76,4	282,1	164,1	165,4
Νότιο Αιγαίο	29,9	161,8	46,6	60,3	91,3	74,6
Κρήτη	26,9	157,7	51,7	86,0	74,0	62,9

Πίνακας 5: Διακύμανση της μέσης υπολογιζόμενης πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη χώρων (kWh/m²) ανά περιφέρεια και κατηγορία κτιρίου.

Περιφέρεια	Κατηγορία κτιρίου					
	I	II	III*	IV	VI**	VII*
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	132,7	215,1	3,4	86,9	131,0	88,3
Κεντρική Μακεδονία	96,6	205,0	3,6	92,7	131,7	91,7
Δυτική Μακεδονία	105,2	186,0	1,9	58,6	81,8	54,4
Θεσσαλία	152,5	263,1	8,1	180,7	153,3	118,8
Ήπειρος	117,5	213,6	6,3	68,5	112,0	76,9
Δυτική Ελλάδα	170,5	280,6	16,9	140,6	161,9	149,6
Ιόνια Νησιά	149,3	295,2	22,6	147,2	177,3	137,6
Στερεά Ελλάδα	156,0	303,8	11,1	155,4	178,7	153,1
Πελοπόννησος	157,1	279,6	14,1	169,3	182,3	133,4
Αττική	192,9	329,8	21,6	165,1	198,4	136,5
Βόρειο Αιγαίο	189,9	301,3	26,8	212,9	196,3	146,7
Νότιο Αιγαίο	135,1	259,2	10,3	58,6	150,3	110,1
Κρήτη	142,6	306,0	15,0	135,1	188,7	136,6

Πίνακας 6: Διακύμανση της μέσης υπολογιζόμενης πρωτογενούς ενέργειας για τεχνητό φωτισμό (kWh/m^2) ανά περιφέρεια και κατηγορία κτιρίου.

Περιφέρεια	Κατηγορία κτιρίου					
	I	II	III*	IV	VI**	VII*
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	306,3	171,0	57,5	176,2	173,2	144,4
Κεντρική Μακεδονία	181,4	164,9	59,5	147,2	162,5	137,0
Δυτική Μακεδονία	338,3	183,4	62,3	146,3	175,8	153,9
Θεσσαλία	237,7	184,1	65,4	153,4	182,0	145,9
Ήπειρος	244,1	190,4	72,3	149,0	187,3	178,7
Δυτική Ελλάδα	294,2	193,4	95,6	166,7	191,4	189,6
Ιόνια Νησιά	245,3	218,3	61,6	211,5	239,9	216,4
Στερεά Ελλάδα	241,7	189,7	67,6	199,3	182,3	135,6
Πελοπόννησος	235,0	161,3	64,0	145,2	181,4	146,9
Αττική	252,8	169,1	77,7	137,2	173,6	150,7
Βορείου Αιγαίου	203,8	172,4	196,1	135,5	210,0	159,0
Νοτίου Αιγαίου	185,9	180,2	60,3	96,7	172,9	139,1
Κρήτης	226,3	238,0	62,1	157,1	236,4	164,6

Εξετάζοντας την συνολική ενεργειακή κατανάλωση για κατηγορίες κτιρίων με σκοπό την ιεράρχηση των δράσεων μεγάλης κλίμακας και την αξιολόγηση αναπτυξιακών σχεδίων βελτίωσης, λαμβάνεται υπόψη η θερμαινόμενη επιφάνεια των κτιρίων κάθε κατηγορίας και υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κτίριο (Πίνακας 7). Κατά μέσο όρο, τα πιο ενεργοβόρα κτίρια βρίσκονται στην Αττική (η οποία έχει και την μεγαλύτερη μέση θερμαινόμενη επιφάνεια κτιρίου) και στην Δυτική Μακεδονία, ενώ τα λιγότερο ενεργοβόρα στο Βόρειο (το οποίο έχει και την μικρότερη μέση τιμή θερμαινόμενης επιφάνειας κτιρίου) και Νότιο Αιγαίο.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα ανά κατηγορία κτιρίου, παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πιο ενεργοβόρες κατηγορίες κτιρίων βρίσκονται στην Αττική, εκτός από τα κτίρια Εκπαίδευσης που βρίσκονται στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη και τα κτίρια Υγείας και Κοινωνικής Πρόνοιας στην Ήπειρο. Αντίστοιχα, στο Νότιο Αιγαίο υπάρχουν οι λιγότερο ενεργοβόρες κατηγορίες κτιρίων, με μόνη εξαίρεση τα κτίρια Προσωρινής διαμονής στο Βόρειο Αιγαίο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ενεργειακή χαρτογράφηση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την ανάλυση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ), αφού προηγήθηκε ένας ποιοτικός έλεγχος αυτών των δεδομένων. Τα δεδομένα από τα διαθέσιμα ΠΕΑ ομαδοποιήθηκαν τελικά σε 30 χρήσεις κτιρίων και 7 βασικές κατηγορίες κτιρίων και αναλύθηκαν για τις 13 περιφέρειες της ελληνικής επικράτειας. Τελικά αναλύθηκαν δεδομένα από 18.491 ΠΕΑ για ολόκληρα κτίρια, 7 βασικών κατηγοριών του τριτογενούς τομέα. Η ενεργειακή τους συμπεριφορά χαρακτηρίζεται μέτρια, καθώς το 30% των κτιρίων κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Δ, ενώ μόλις το 6% κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Β ή καλύτερη.

Με βάση τα αποτελέσματα από την ανάλυση των ΠΕΑ, η πιο ενεργοβόρος κατηγορία κτιρίων είναι τα κτίρια Υγείας και Κοινωνικής Πρόνοιας με μέση υπολογιζόμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κτίριο 1061,3 MWh και αντίστοιχες εκπομπές CO₂ 329,1 t. Αντίθετα, τα κτίρια Εμπορίου, παρά τον μεγάλο τους αριθμό, είναι τα λιγότερο ενεργοβόρα κτίρια με μέση υπολογιζόμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κτίριο 127,8 MWh και αντίστοιχες εκπομπές CO₂ 41,9 t.

Σε δεύτερο στάδιο, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή των κτιρίων κάθε κατηγορίας στις περιφέρειες, μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για το ενεργειακό προφίλ ανά περιφέρεια. Με βάση τον αριθμό κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την απογραφή του 2011, η Κεντρική Μακεδονία είναι η πιο ενεργοβόρος περιφέρεια και ακολουθεί η Αττική, παρά το γεγονός ότι έχει τα πιο ενεργοβόρα κτίρια

(με βάση την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κτίριο). Τα Ιόνια Νησιά είναι η λιγότερο ενεργοβόρος περιφέρεια, με δεύτερη το Βόρειο Αιγαίο. Οι εκπομπές CO₂ ακολουθούν την χωρική κατανομή της πρωτογενούς ενέργειας.

Για την πλήρη χαρτογράφηση του κτιριακού αποθέματος, όσον αφορά στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, απαιτούνται πιο αναλυτικά δεδομένα για τα κτίρια του τριτογενούς τομέα. Οι δείκτες που παρουσιάστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του κτιριακού αποθέματος των κτιρίων του τριτογενή τομέα. Επίσης στα πλαίσια του έργου CESBA MED θα χρησιμοποιηθούν ως όρια αναφοράς για την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων της ενεργειακής επίδοσης δημόσιων κτιρίων και την δημιουργία της κοινής κλίμακας βαθμολόγησης για τους επιμέρους δείκτες κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών CO₂.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις της Μεσογείου (<https://cesba-med.interreg-med.eu>) που υλοποιείται με τη συγχρηματοδότηση του προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας στη Μεσόγειο (Interreg MED). Συντονιστής του έργου είναι η Πόλη του Τορίνο και συμμετέχουν από την Αυστρία: Association of Common European Sustainable Built Environment Assessment (CESBA), την Γαλλία: Envirobat BDM, Auvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement, Urban Community of Marseille Metropolitan Province, την Ελλάδα: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, την Ισπανία: Government of Catalonia, Municipality Sant Cugat del Vallès, την Ιταλία: City of Torino, iSBE Italia R&D srl, Municipality of Udine, την Κροατία: Energy Institute Hrnjevo Rožar και την Μάλτα: University of Malta. Για περισσότερες πληροφορίες: <https://cesba-med.interreg-med.eu/>. Το περιεχόμενο της εργασίας δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τη γνώμη της ΕΕ. Οι συγγραφείς κατέβαλαν κάθε δυνατή προσπάθεια για την προετοιμασία της εργασίας προς όφελος του κοινού με τις διαθέσιμες πληροφορίες. Το πρόγραμμα Interreg MED και η ΕΕ δεν φέρουν ευθύνη για οποιαδήποτε χρήση των πληροφοριών που παρουσιάζονται.

Η επίσημη βάση δεδομένων για το μητρώο των πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης (www.buildingcert.gr) αναπτύχθηκε και συντηρείται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας ΥΠΕΝ σε συνεργασία με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Οι συγγραφείς ευχαριστούν το ΥΠΕΝ για την άδεια πρόσβασης στα ΠΕΑ. Η ανάλυση που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία δεν απηχούν κατ'ανάγκη την επίσημη γνώμη του Υπουργείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] BPIE. 2011. Europe's Buildings under the Microscope. Brussels: Buildings Performance Institute Europe. http://www.bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/20/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf
- [2] EU, 2016. Energy datasheets: EU-28 countries. Brussels: European Commission. <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country>
- [3] ELSTAT. 2015. Buildings Census 2011. Athens: Hellenic Statistical Authority. www.statistics.gr/census-buildings-2011
- [4] BPIE. 2016. Data hub for the energy performance of buildings. Brussels: Buildings Performance Institute Europe. <http://www.buildingsdata.eu/country-factsheets>
- [5] Balaras C.A, Dascalaki E.G, Droutsas K.G., Morro A., Barbano G., Chanussot L., Cazes J., Zidar M., Bačan I., Martí i Ragué X., Borg R.P., Presotto A. (2017): CESBA MED D3.1.1. Transnational Indicators and Assessment Methods for Buildings and Urban areas, CESBA MED Consortium, Marseille.
- [6] Droutsas K.G., S. Kontoyiannidis, E.G. Dascalaki, C.A. Balaras. 2016. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (energy performance certificate) Data. Energy 98:284-295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.137>
- [7] Gangoilells M., M. Casals, N. Forcada, M. Macarulla, E. Cuerva. 2016. Energy mapping of existing building stock in Spain. Journal of Cleaner Production 112:3895-3904. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.105>

11^ο Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας • Ι.Η.Τ. • Θεσσαλονίκη, 14-16.03.2018Πίνακας 7: Υπολογιζόμενη μέση κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και εκπομπές CO₂ κτιρίου, ανά κατηγορία κτιρίου και ανά περιφέρεια.

Περιφέρεια	Πρωτογενής ενέργεια κτιρίου (MWh/κτίριο)											Εκπομπές CO ₂ κτιρίου (t/κτίριο)						
	Κατηγορία Κτιρίου											Κατηγορία Κτιρίου						
	Όλες	I	II	III	IV	V	VI	VII	Όλες	I	II	III	IV	V	VI	VII		
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	245,5	294,3	171,0	324,1	2145,7	104,4	164,3	76,0	90,9	52,4	95,3	659,2	33,6	51,4				
Κεντρική Μακεδονία	252,6	301,4	196,7	266,3	1319,7	167,8	207,8	78,0	95,7	60,4	74,7	386,4	54,6	66,0				
Δυτική Μακεδονία	262,9	818,1	219,1	321,3	981,0	115,7	266,1	74,2	230,7	65,0	89,4	239,3	34,9	71,7				
Θεσσαλία	157,7	233,8	145,0	210,6	288,7	113,5	197,1	48,9	73,0	44,2	62,1	92,3	36,1	61,8				
Ήπειρος	208,6	194,0	165,5	175,1	3887,7	102,6	199,3	66,5	60,4	51,3	51,2	1309,8	33,2	63,5				
Δυτική Ελλάδα	149,6	365,1	144,5	126,2	239,9	119,2	195,6	48,7	118,0	45,4	40,4	82,2	39,3	68,8				
Ιόνια Νησιά	188,8	227,8	167,0	88,6	63,7	90,6	129,2	61,0	73,9	51,9	23,8	19,8	30,0	42,0				
Στερεά Ελλάδα	184,2	400,1	178,1	168,5	438,6	97,4	226,9	58,5	128,2	55,4	49,2	138,5	31,6	74,4				
Πελοπόννησος	182,9	296,1	128,7	127,1	1338,3	104,6	155,9	58,1	92,8	40,4	38,9	421,9	34,4	50,6				
Αττική	310,4	913,1	241,3	200,8	973,2	174,5	396,7	101,1	289,9	76,7	63,6	308,7	58,0	132,5				
Βορείου Αιγαίου	112,6	153,1	134,7	78,7	621,8	69,4	96,4	36,0	48,7	42,4	26,1	209,8	22,5	31,1				
Νοτίου Αιγαίου	146,3	230,3	98,3	62,3	43,6	68,4	92,1	47,7	74,9	31,8	19,6	15,4	22,6	30,6				
Κρήτης	162,5	221,4	109,4	96,6	387,9	117,7	250,1	53,6	72,9	35,2	30,3	119,5	39,4	84,2				

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛΩΝ ΚΕΝΟΥ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

ΕΛΛΗ ΚΥΡΙΑΚΗ^{1*}, ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΓΚΑΡΟΣ¹, ΑΓΙΣ Μ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ¹

^{1*} Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Θεσσαλονίκη, 54124, Ελλάδα,
e-mail: kelli@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εδώ και δεκαετίες αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας έχει σημαντικές συνέπειες σε περιβαλλοντικό και οικονομικό επίπεδο. Στην Ευρώπη, ο τομέας των κτιρίων κατοικιών ευθύνονταν το 2015 για το 24,8% % της κατανάλωσης ενέργειας ενώ ο τριτογενής τομέας για το 13,3%. Κατά συνέπεια τα κτίρια ευθύνονταν για το 38,1% της κατανάλωσης ενέργειας και για το 36% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Το κτιριακό κέλυφος αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα που μπορεί να οδηγήσει στην αισθητή μείωση των θερμικών φορτίων του κτιρίου και κατά συνέπεια της απαιτούμενης ενεργειακής κατανάλωσης πρωτίστως για θέρμανση αλλά και για την ψύξη. Παράλληλα, με τη χρήση πιο φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, μπορεί συνολικά να επιτευχθεί μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στον κτιριακό τομέα.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τα υπερμονωτικά υλικά νέας τεχνολογίας (superinsulating materials), με ιδιαίτερη έμφαση στα θερμομονωτικά πανέλα κενού (Vacuum Insulation Panels – VIPs). Εξετάζεται η εφαρμογή των θερμομονωτικών πανέλων σε υφιστάμενα κτίρια ελλιπούς θερμομόνωσης, σε τέσσερις διαφορετικές ευρωπαϊκές πόλεις με αντίστοιχα διαφορετικά κλιματικά στοιχεία. Η αξιολόγηση της επίπτωσης στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων γίνεται με χρήση του λογισμικού Open Studio-Energy plus. Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί η οικονομική αξιολόγηση, με την μέθοδο της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost – L.C.C., ώστε να κριθεί εάν η εφαρμογή τέτοιων υλικών είναι τελικά σκόπιμη ή όχι.

Λέξεις Κλειδιά: υπερμονωτικά υλικά, θερμομονωτικά πανέλα κενού, ενεργειακή αποδοτικότητα, κτιριακό κέλυφος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας στον κτιριακό τομέα, με την συνεπαγόμενη αύξηση στις εκπομπές αέριων ρύπων, έχουν εξελιχθεί σε σημαντικά προβλήματα παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, η συνεχής αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση, η ανάγκη για περισσότερες και υψηλότερου επιπέδου κτιριακές υποδομές, όπως και η απαίτηση για καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης στα κτίρια, οδήγησαν στην ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Ως αποτέλεσμα, κρίθηκε αναγκαία η θέσπιση ενός νομοθετικού πλαισίου με στόχους τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από υδρογονάνθρακες, την αύξηση της συμμετοχής των Α.Π.Ε., τη μείωση των εκπομπών ρύπων και την προστασία του περιβάλλοντος συνολικότερα.

Σε αυτό το υπόβαθρο, η Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια της στρατηγικής της για την ενέργεια, όρισε τους στόχους της για το 2030, οι οποίοι μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν, μείωση κατά 40% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 και τουλάχιστον 27% της καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από Α.Π.Ε. [1].

Στην Ευρώπη, ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 38,1% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ξεπερνώντας σε ποσοστό τους άλλους δύο κύριους τομείς που συμμετέχουν στην συνολική κατανάλωση ενέργειας: το βιομηχανικό τομέα και τις μεταφορές. Επίσης, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας του κτιριακού τομέα, τον καθιστά μία σημαντική πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος, με σημαντικό ποσοστό στην έκλυση αερίων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Ενδεικτικά, 36% των συνολικών εκπομπών CO₂ στην Ευρώπη, προέρχονται από τις καταναλώσεις ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Η βελτίωση συνεπώς, της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 5-6% και χαμηλότερες εκπομπές CO₂ κατά 5% [2].

Στο πλαίσιο αυτό έχουν θεσπιστεί στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, ενεργειακοί κανονισμοί με στόχο τη βελτίωση της θερμικής προστασίας του κτιριακού κελύφους, πρωτίστως μέσω της μείωσης των θερμικών απωλειών και τη βελτίωση της αεροστεγανότητας. Οι ολοένα και αυστηρότεροι αυτοί ενεργειακοί κανονισμοί, έχουν ως αποτέλεσμα την απαίτηση επίτευξης αρκετά χαμηλών συντελεστών θερμοπερατότητας U [W/(m²·K)] του κτιριακού κελύφους. Όπως είναι εύλογο, τα όρια των συντελεστών διαφέρουν μεταξύ των Ευρωπαϊκών χωρών αλλά συχνά και μεταξύ των διαφορετικών περιοχών μέσα στις ίδιες χώρες, συνεκτιμώντας τις διάφορες κλιματικές συνθήκες. Ο παραδοσιακός τρόπος για να επιτευχθούν οι αυστηρότεροι συντελεστές θερμοπερατότητας, είναι η αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης. Ωστόσο, αυτή η λύση έχει μειονεκτήματα και, εντέλει, όρια, καθώς οδηγεί σε αισθητά αυξημένο πάχος κατασκευής των εξωτερικών δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους, μειωμένη καθαρή εσωτερική επιφάνεια χρήσης, αλλά και υπό συνθήκες σε τεχνικά προβλήματα στην κατασκευή και τη σύνδεση επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων καθώς και εμπόδια στον σχεδιασμό και την υλοποίηση κατασκευαστικών επιλογών ως προς την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Επίσης, γίνεται χρήση περισσότερης ποσότητας θερμομονωτικού υλικού, που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη βιομηχανική παραγωγή υλικού, αυξημένο κόστος παραγωγής, μεταφοράς και εντέλει κατασκευής, καθώς και μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω του επιπρόσθετου υλικού [3],[4]. Έτσι, η έρευνα και οι μελέτες, οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών τα οποία επιτυγχάνουν πολύ χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ, και επομένως πολύ μεγαλύτερη θερμική αντίσταση R, για μικρότερο πάχος διατομής και μικρότερο βάρος δομικού στοιχείου σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά [5],[6].

2. ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΠΑΝΕΛΑ ΚΕΝΟΥ

Τα Θερμομονωτικά Πανέλα Κενού (Vacuum Insulation Panels – VIPs) και εφεξής Θ.Π.Κ. θεωρούνται ένα από τα πιο υποσχόμενα θερμομονωτικά υλικά νέας γενιάς για κτιριακές εφαρμογές. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς τους λ [W/(m·K)] κυμαίνεται από 0,004 W/(m·K) σε αρχικές συνθήκες, έως 0,008 W/(m·K) στα 25 χρόνια μετά την εφαρμογή τους, τιμές που είναι 5-10 φορές καλύτερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών θερμομονωτικών υλικών.

Το Θ.Π.Κ., αποτελείται από ένα πορώδες υλικό, με πόρους ανοιχτού τύπου, το οποίο περικλείεται σε ένα πολυστρωματικό αεροστεγανό περίβλημα που σφραγίζεται αεροστεγώς, δημιουργώντας συνθήκες κενού στο εσωτερικό του [7]. Το περίβλημα πρέπει να παραμένει αδιαπέραστο για τον αέρα και τους υδρατμούς, ώστε να διατηρηθούν οι θερμομονωτικές ιδιότητες του πάνελου σε βάθος χρόνου. Επιπροσθέτως, τοποθετούνται τα απορροφητικά και ξηραντικά μέσα στο εσωτερικό του, ώστε να μπορούν να απορροφούν μικρές ποσότητες αέρα και υδρατμών που ενδεχομένως να έχουν εισχωρήσει διαμέσου του περιβλήματος [8],[9].

Το υλικό στον πυρήνα του Θ.Π.Κ. είναι υπεύθυνο για τη διασφάλιση της επίτευξης των μηχανικών και θερμοφυσικών ιδιοτήτων του πάνελου. Τα πιο συνηθισμένα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι: α) πυρογενής πυριτιά, β) αεροζέλ, γ) πολουρεθάνη και διογκωμένη πολυστερίνη και δ) ίνες υάλου. Εξίσου σημαντικό στοιχείο αυτών των υλικών αποτελεί το περίβλημα (envelope). Ο σκοπός του περιβλήματος είναι να επιτύχει και διατηρήσει τις επιθυμητές συνθήκες κενού στον πυρήνα, αποτρέποντας την εισχώρηση αέρα και υδρατμών. Το περίβλημα αποτελείται από πολύ λεπτές στρώσεις η κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από την στρώση σφράγισης (sealing layer), την στεγανοποιητική στρώση (barrier layer) και την προστατευτική στρώση (protective layer) [7]. Η αποδοτικότητα των Θ.Π.Κ. εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τη διατήρηση των συνθηκών κενού στο εσωτερικό τους, καθώς πιθανή εισχώρηση μαζών αέρα και υδρατμών διαμέσου του περιβλήματος, θα μειώσει σημαντικά την απόδοση και τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες. Η φθορά τους και η απώλεια των συνθηκών κενού στο εσωτερικό τους, μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ έως τα 0,020 W/(m·K), ωστόσο συνήθως η τιμή του συντελεστή λ συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου των θερμογεφυρών και της φθοράς των πάνελ λόγω γήρανσης 25 περίπου χρόνια μετά την εφαρμογή τους, εκτιμάται σε 0,007-0,008 W/(m·K).

Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος επηρεάζουν σημαντικά την πιθανότητα εισχώρησης αερίων και υδρατμών στον πυρήνα, για τον λόγο αυτό και οι δοκιμές του Θ.Π.Κ. για αντοχή σε γήρανση πρέπει να προσομοιώνουν ένα ευρύ φάσμα κλιματικών συνθηκών.

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, τα Θ.Π.Κ. μπορούν επομένως να συνεισφέρουν στην πολύ ισχυρή θερμική προστασία δομικών στοιχείων του κτιρίου, όπως η τοιχοποιία, η στέγη και, υπό όρους, το δάπεδο. Αυτό αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε περιπτώσεις υφιστάμενων κτιρίων όπου ο χώρος για την αναδρομική θερμομόνωση είναι αντικειμενικά περιορισμένος. Αν αναλογιστεί κανείς ότι σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες με τους ισχύοντες κανονισμούς απαιτούνται από 25 έως 40 cm ενός καλού, συμβατικού θερμομονωτικού υλικού, με λ περί το 0,035 W/(m·K), γίνεται εύκολα κατανοητό ότι χρήση ενός υλικού που θα επιτυγχάνει τις απαιτήσεις πάχους μόλις 5 cm, είναι ιδιαίτερα ελκυστική, ιδιαίτερα στα υφιστάμενα κτίρια. Ωστόσο, υπάρχουν και προβλήματα κατά την εφαρμογή των Θ.Π.Κ., με κυριότερα την εξασθένηση της θερμικής τους αντίστασης σε βάθος χρόνου και την ευαισθησία τους σε φθορές, ζημιές κλπ. Επίσης, το φαινόμενο των θερμογεφυρών θέλει προσοχή στους αρμούς, ενώ η παραγωγή τους σε προκαθορισμένα μεγέθη, σε συνδυασμό με την απαγόρευση κοπής τους, οδηγεί σε αύξηση του κόστους όταν απαιτούνται ειδικές διαστάσεις.

Εξαιρώντας πάντως τις υπερβολικές μηχανικές καταπονήσεις και τις αστοχίες κατά την τοποθέτησή τους, η διείσδυση αέρα και υδρατμών στον πυρήνα του πάνελ, αποτελεί την πιο σημαντική αιτία γήρανσης των πάνελων σε βάθος χρόνου. Καθώς τα Θ.Π.Κ. είναι στην αγορά από τα μέσα της δεκαετίας του 2000, τώρα μόλις αρχίζουν να υπάρχουν στοιχεία γι' αυτήν την συμπεριφορά τους από πραγματικές – και όχι εργαστηριακές – εφαρμογές.

Στο διάστημα αυτό, συναντώνται πλέον πολλές περιπτώσεις χρήσης των Θ.Π.Κ., τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια, κυρίως στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη. Συμπεράσματα από την έως τώρα εφαρμογή τους, καθώς και βέλτιστες πρακτικές εφαρμογής μπορεί κανείς πλέον να βρει σε δημοσιευμένη βιβλιογραφία [8, 10, 7, 11, 12, 13].

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των Θ.Π.Κ. και η επίδρασή τους στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου υπό διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν ενεργειακές προσομοιώσεις για υφιστάμενα κτίρια κατοικιών ελλιπούς θερμομόνωσης, σε τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ευρώπης.

Επιλέχθηκε μία πόλη με υποτροπικό, θερμό κλίμα όπως η Λευκωσία, μια πόλη με εύκρατο μεσογειακό κλίμα όπως η Θεσσαλονίκη, μια πόλη της κεντρικής Ευρώπης με ηπειρωτικό κλίμα, όπως το Βερολίνο και μια πόλη με ψυχρό, σκανδιναβικό κλίμα, όπως η Στοκχόλμη.

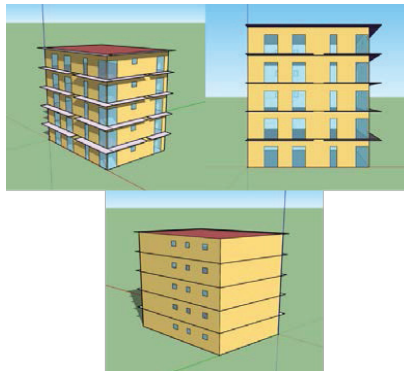
Με αυτόν τον τρόπο καλύφθηκε ένα επαρκές εύρος κλιματικών ζωνών για την μελέτη της συμπεριφοράς των Θ.Π.Κ. στον κτιριακό τομέα.

Η επιλογή του πάχους των θερμομονωτικών πανέλων κενού που χρησιμοποιούνται ως εξωτερική θερμομόνωση στα υφιστάμενα κτίρια, γίνεται με βάση τους απαιτούμενους από την νομοθεσία της κάθε χώρας, συντελεστές θερμοπερατότητας U [$W/(m^2 \cdot K)$]. Συγκεκριμένα, επιλέγεται το απαραίτητο πάχος Θ.Π.Κ. που ικανοποιεί τα όρια του συντελεστή θερμοπερατότητας U [$W/(m^2 \cdot K)$] της τοιχοποιίας βάσει της υπάρχουσας νομοθεσίας της εκάστοτε χώρας και συγκρίνεται με την αντίστοιχη συμβατική θερμομόνωση που θα επιτύγχανε την ίδια απόδοση και τις ίδιες καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης σε κάθε περίπτωση. Επίσης, στη μελέτη λαμβάνεται υπ' όψη η φθορά των θερμομονωτικών πανέλων κενού και η αλλοίωση των ιδιοτήτων τους με την πάροδο των χρόνων. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της αύξησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ [$W/(m \cdot K)$] των θερμομονωτικών πανέλων κενού, λόγω εισχώρησης αέρα και υγρασίας σε αυτά, στις ενεργειακές καταναλώσεις του κτιρίου. Η μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου εκτείνεται σε βάθος 30 ετών, συνυπολογίζοντας την αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να διαπιστωθεί πως επηρεάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις.

Η μελέτη εκπονήθηκε με χρήση του λογισμικού Sketch Up για την ψηφιακή σχεδίαση του κτιρίου και της ενιαίας πλατφόρμας λογισμικών Open Studio και Energy Plus για την εκτέλεση των ενεργειακών προσομοιώσεων.

3.1. Υφιστάμενη κατάσταση

Τα κτίρια που μελετώνται στις διάφορες κλιματικές ζώνες είναι γεωμετρικά όμοια μεταξύ τους. Το υπό μελέτη κτίριο είναι μια πενταώροφη πολυκατοικία (ισόγειο και 4 όροφοι) συνολικού ωφέλιμου εμβαδού $748,8 \text{ m}^2$. Οι διαστάσεις του κτιρίου είναι 14,4m μήκος, 10,4m πλάτος και 18m ύψος. Στην Εικόνα 1, απεικονίζεται το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του κτιρίου, όπως σχεδιάστηκε στο Sketch Up. Συγκεκριμένα διακρίνονται η νότια όψη με τα περισσότερα ανοίγματα καθώς και η ανατολική. Η πολυκατοικία δεν έρχεται σε επαφή και δεν σκιάζεται από κάποιο άλλο κτίριο σε καμία όψη. Η νότια και η ανατολική όψη έχουν τα περισσότερα ανοίγματα, ενώ η βόρεια διαθέτει μόνο 3 υαλόφρακτες επιφάνειες ανά όροφο. Η δυτική όψη δεν διαθέτει κάποια ανοίγματα. Οι 5 όροφοι είναι τυπικοί και ο κάθε ένας από αυτούς αποτελείται από δύο όμοια διαμερίσματα.



Εικόνα 1: Ψηφιακή απεικόνιση του υπό μελέτη κτιρίου

Τα κτίρια στην υφιστάμενη κατάσταση έχουν στην τοιχοποιία συμβατική θερμομόνωση πάχους 5cm στη Λευκωσία, τη Θεσσαλονίκη και το Βερολίνο και 10 cm στη Στοκχόλμη. Μπορεί σε πρώτη ανάγνωση να ξενίζει το ίδιο πάχος στις τρεις από τις τέσσερις πόλεις, ωστόσο έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι ο Κυπριακός Κανονισμός Θερμομόνωσης έθετε από το 2008 ως το 2017 τις ίδιες απαιτήσεις με τον Ελληνικό Κανονισμό Θερμομόνωσης του 1979 και τον Γερμανικό Κανονισμό του 1977. Κατά συνέπεια, αναφερόμενοι στο κτιριακό απόθεμα, ένα κτίριο του 1985 σε Θεσσαλονίκη και Βερολίνο θα

είχε την ίδια θερμομονωτική προστασία, αποδεικνύοντας την αυστηρότητα του παλιού ελληνικού κανονισμού, ενώ ένα πολύ καινούριο κτίριο στην Κύπρο θα είχε επίσης την ίδια προστασία – βεβαίως υπό τελείως διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Στον Πίνακα 1, αναφέρεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας για την υφιστάμενη κατάσταση σε κάθε πόλη καθώς και ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης της κάθε χώρας.

Πίνακας 1: Συντελεστές Θερμοπερατότητας Υφιστάμενης Κατάστασης για τις υπό μελέτη πόλεις

Πόλη	Συντελεστής θερμοπερατότητας τοιχοποιίας U	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας U _{max}
Θεσσαλονίκη	0,493	0,45
Λευκωσία	0,493	0,40
Βερολίνο	0,493	0,30
Στοκχόλμη	0,289	0,18

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1. Επιλογή Θερμομονωτικού Πανέλου Κενού

Για τις παρεμβάσεις στα υφιστάμενα κτίρια, επιλέχθηκαν θερμομονωτικά πάνελα κενού ειδικά για κτιριακές εφαρμογές. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε το προϊόν va-Q-vir B της γερμανικής εταιρίας va-Q-tec που ειδικεύεται στην κατασκευή θερμομονωτικών πανέλων κενού. Το συγκεκριμένο προϊόν διαθέτει πυρήνα από πυρογενή πυριτία και κέλυφος με πρόσθετη στρώση από υαλώδεις ίνες για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις μηχανικές καταπονήσεις. Στον Πίνακα 2, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/(m·K)) του υλικού.

Πίνακας 2: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του Θ.Π.Κ.

Συντελεστής Θερμικής αγωγιμότητας θερμομονωτικών πανέλ κενού				
λ (W/mK)	1 ^ο έτος	10 ^ο έτος	20 ^ο έτος	30 ^ο έτος
	0,0043	0,0059	0,0074	0,008

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται ανά πόλη οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας μετά την εφαρμογή των θερμομονωτικών πανέλων κενού, ώστε σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής θερμοπερατότητας να είναι εντός του εκάστοτε κανονισμού.

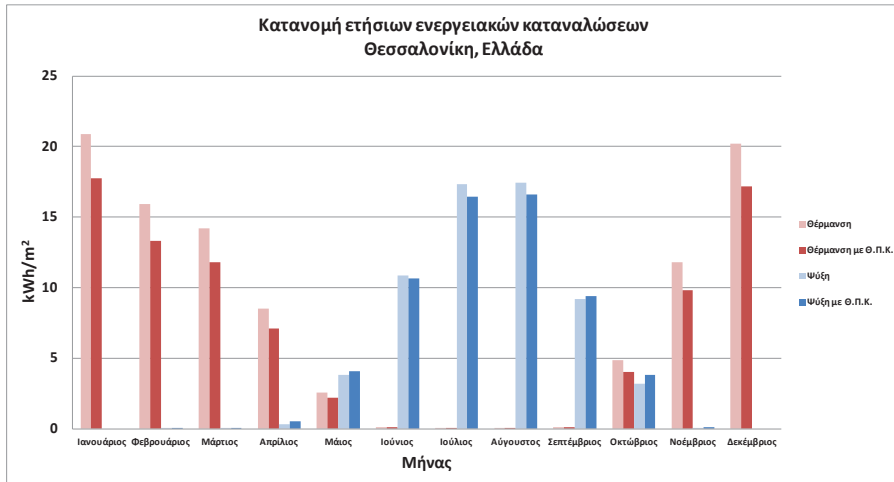
Πίνακας 3: Συντελεστές Θερμοπερατότητας μετά την εφαρμογή του Θ.Π.Κ.

Πόλη	Συντελεστής θερμοπερατότητας τοιχοποιίας U	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας U _{max}
Θεσσαλονίκη (1cm Θ.Π.Κ)	0,229	0,45
Λευκωσία (1cm Θ.Π.Κ)	0,229	0,40
Βερολίνο (1cm Θ.Π.Κ)	0,229	0,30
Στοκχόλμη (1.5cm Θ.Π.Κ)	0,144	0,18

4.2. Ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης

Από την προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων προέκυψαν οι ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης σε μηνιαία βάση, για κάθε μία από τις τέσσερις πόλεις, πριν και μετά την εφαρμογή των Θ.Π.Κ.

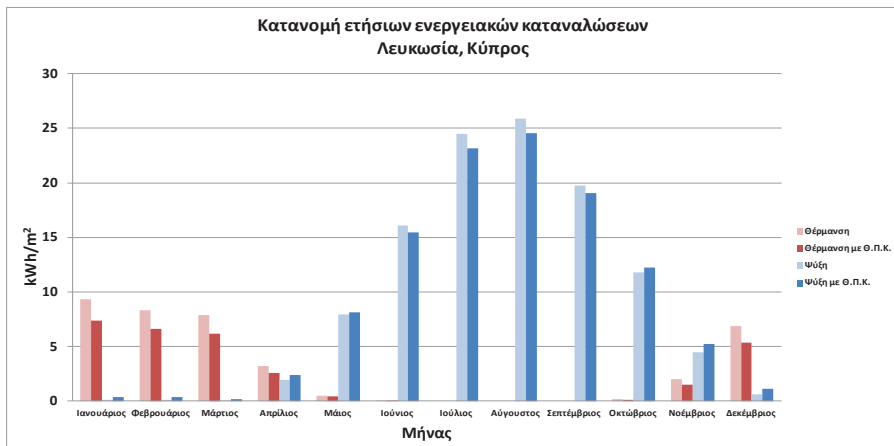
Στην Εικόνα 2, φαίνονται οι ενεργειακές καταναλώσεις που προέκυψαν για την Θεσσαλονίκη.



Εικόνα 2: Ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης, Θεσσαλονίκη

Όπως παρατηρείται, υπάρχει μία μείωση της τάξης του 16% στις καταναλώσεις που αφορούν τη θέρμανση, μετά την τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης με Θ.Π.Κ. στο υφιστάμενο κτίριο. Από την άλλη πλευρά, οι καταναλώσεις που αφορούν την ψύξη του κτιρίου επηρεάστηκαν ελάχιστα από την εφαρμογή των Θ.Π.Κ.

Στην Εικόνα 3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη Λευκωσία.

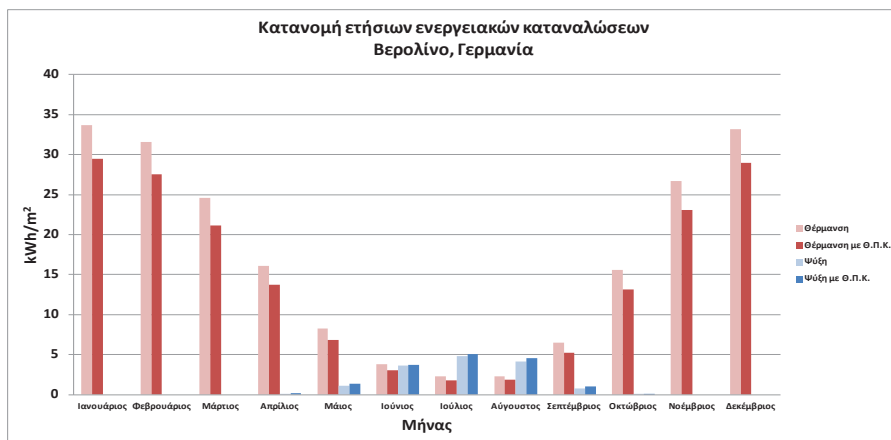


Εικόνα 3: Ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης, Λευκωσία

Η εφαρμογή των Θ.Π.Κ. στο κτιριακό κέλυφος, οδήγησε σε μείωση των καταναλώσεων θέρμανσης κατά 21%, ενώ επηρέασε ελάχιστα τις καταναλώσεις ψύξης. Επίσης λόγω του πολύ θερμού κλίματος της Λευκωσίας, είναι αισθητή η διαφορά ανάμεσα στις καταναλώσεις

θέρμανσης και ψύξης, με τις τελευταίες να είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερες από τις πρώτες. Λόγω του πολύ θερμού κλίματος της Λευκωσίας, οι καταναλώσεις της θέρμανσης είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της ψύξης ακόμη και σε φθινοπωρινούς μήνες, με χαρακτηριστικό το παράδειγμα του Νοεμβρίου.

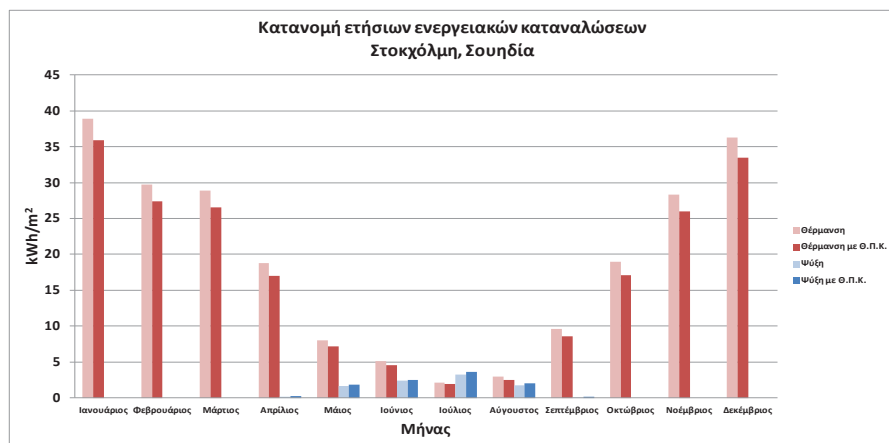
Στην Εικόνα 4, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το Βερολίνο.



Εικόνα 4: Ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης, Βερολίνο

Η χρήση των Θ.Π.Κ. οδήγησε σε μείωση κατά 14% των καταναλώσεων για θέρμανση, σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, ενώ και σε αυτή την περίπτωση οι καταναλώσεις για ψύξη (που ούτως ή άλλως ήταν μικρές) επηρεάστηκαν ελάχιστα από την παρέμβαση. Εξαιτίας του ψυχρού κλίματος που επικρατεί στην πόλη του Βερολίνου, οι καταναλώσεις της θέρμανσης λαμβάνουν υψηλές τιμές κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους, ενώ είναι χαρακτηριστικό πώς ακόμη και κατά τη θερινή περίοδο οι ανάγκες για θέρμανση είναι υπαρκτές και σε ορισμένες περιπτώσεις, με χαρακτηριστικό το παράδειγμα του Ιουνίου, ξεπερνούν τις καταναλώσεις που αφορούν την ψύξη.

Τέλος, στην Εικόνα 5, παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν στη Στοκχόλμη, την πιο ψυχρή πόλη που επιλέχθηκε στα πλαίσια της μελέτης.



Εικόνα 5: Ενεργειακές καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης, Στοκχόλμη

Όπως παρατηρείται, επιτεύχθηκε μία μείωση της τάξης του 9% στις καταναλώσεις που αφορούν τη θέρμανση, μετά την τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης με Θ.Π.Κ. στο

υφιστάμενο κτίριο. Ο λόγος της μικρής σχετικά μείωσης είναι ότι το κτίριο διέθετε ήδη μια αρκετά ισχυρή θερμομονωτική προστασία, χάρις στον αυστηρότερο (ήδη από το 1970) σουηδικό κανονισμό. Από την άλλη, οι καταναλώσεις που αφορούν την ψύξη του κτιρίου επηρεάστηκαν ελάχιστα. Όπως ήταν αναμενόμενο, εξαιτίας του κλίματος της Στοκχόλμης, οι καταναλώσεις θέρμανσης είναι πολύ μεγαλύτερες από των αντίστοιχων της ψύξης και κυριαρχούν σε όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμη και κατά τη θερινή περίοδο όπου λαμβάνουν υψηλότερες τιμές από αυτές της ψύξης, με μοναδική εξαίρεση τον μήνα Ιούλιο.

Στο Βερολίνο και την Στοκχόλμη, παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην κατανάλωση της ψύξης. Η πολύ καλή θερμομόνωση του κτιριακού κελύφους σε συνδυασμό με τα αυξημένα εσωτερικά φορτία και τον μειωμένο ρυθμό φυσικού αερισμού, μπορεί να δικαιολογήσει την μικρή αυτή αύξηση στην κατανάλωση της ψύξης. Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι σε αυτές τις δύο πόλεις, τα ψυκτικά φορτία είναι πάρα πολύ μικρά και συνεπώς σε απόλυτη τιμή η κατανάλωση της ψύξης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Εκτός από τις καταναλώσεις ενέργειας για θέρμανση και ψύξη αμέσως μετά την τοποθέτηση των Θ.Π.Κ., εκτιμήθηκε και η επίδραση της αύξησης του συντελεστή λ που παρουσιάζουν με την πάροδο του χρόνου και κατά συνέπεια η εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, σε βάθος 30 χρόνων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Επίδραση της αύξησης του συντελεστή λ στην κατανάλωση της θέρμανσης

Πόλη	Αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανσης μετά από 30 έτη [%]
Θεσσαλονίκη	6
Λευκωσία	8
Βερολίνο	5
Στοκχόλμη	3

4.3. Ισοδύναμη Συμβατική Θερμομόνωση

Στα πλαίσια των ενεργειακών προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, εκτιμήθηκε η ισοδύναμη συμβατική θερμομόνωση που απαιτείται, ώστε να προκύψουν ίδιες καταναλώσεις με τις μέσες καταναλώσεις του κτιρίου στην περίοδο των 30 ετών, στην περίπτωση εφαρμογής Θ.Π.Κ. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αναγράφονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Επιλογή πάχους ισοδύναμης συμβατικής θερμομόνωσης

Πόλη	Πάχος Θ.Π.Κ. [cm]	Πάχος ισοδύναμης συμβατικής θερμομόνωσης [cm]
Θεσσαλονίκη	1	6
Λευκωσία	1	6
Βερολίνο	1	6
Στοκχόλμη	1.5	9

4.4. Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής

Μετά την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης της αναδρομικής θερμομόνωσης με χρήση Θ.Π.Κ., είναι απαραίτητη και η οικονομική αξιολόγηση των συγκεκριμένων παρεμβάσεων καθώς και η σύγκρισή τους με την εναλλακτική λύση της εφαρμογής συμβατικής θερμομόνωσης.

Καταρχάς υπολογίστηκε το αρχικό κόστος επένδυσης των παρεμβάσεων, τόσο για την περίπτωση των Θ.Π.Κ., όσο και για τη συμβατική θερμομόνωση, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος των υλικών και αυτό της τοποθέτησής τους. Το κόστος θεωρήθηκε ίσο και για τις 4 χώρες, αν και υπάρχουν διαφορές στις επιμέρους συνιστώσες του: Το κόστος των υλικών παρουσιάζει διακυμάνσεις της τάξης του 5 -10 από χώρα σε χώρα, με τις τιμές να είναι υψηλότερες στην Κύπρο και στην Ελλάδα, κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους της αγοράς. Αντίθετα, το κόστος εργασίας για την τοποθέτηση τους είναι περίπου 20% - 25% χαμηλότερο στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Καθώς το κόστος εργασίας αποτελεί περίπου το 30% του συνολικού κόστους, το τελικό αποτέλεσμα είναι το συνολικό κόστος να είναι πρακτικά το ίδιο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ετήσιο κόστος λειτουργίας που αφορά τη θέρμανση του κτιρίου σε βάθος τριακονταετίας, λαμβάνοντας υπ' όψη τις αντίστοιχες ενεργειακές καταναλώσεις για θέρμανση και τις τιμές των καυσίμων της εκάστοτε εξεταζόμενης περίπτωσης στις οποίες θεωρήθηκε ετήσια αύξηση 3%. Δαπάνες συντήρησης στην συγκεκριμένη μελέτη θεωρούνται αμελητέες, επομένως το Κόστος Κύκλου Ζωής για την κάθε περίπτωση, προκύπτει από το άθροισμα του αρχικού κόστους επένδυσης και του συνολικού κόστους λειτουργίας για την περίοδο των 30 ετών μετά την παρέμβαση.

4.4.1. Κόστος Επένδυσης

Το κόστος επένδυσης για την Θεσσαλονίκη, την Λευκωσία και το Βερολίνο είναι ίδιο καθώς και στις τρεις περιπτώσεις τοποθετήθηκε ίδιο πάχος Θ.Π.Κ καθώς και ίδιο πάχος συμβατικής θερμομόνωσης. Συνεπώς, στον Πίνακα 6, παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη επένδυσης για τις 3 πόλεις και στον Πίνακα 7, τα αντίστοιχα κόστη επένδυσης για την Στοκχόλμη.

Πίνακας 6: Κόστος επένδυσης για Θεσσαλονίκη, Λευκωσία, Βερολίνο

Θερμομονωτικό υλικό παρέμβασης	Va-Q-vip B	Ισοδύναμη συμβατική θερμομόνωση
Πάχος υλικού (mm)	10	60
Κόστος υλικού (€/m ²)	80 / 80 / 75	25
Κόστος τοποθέτησης (€/m ²)	15 / 15 / 20	15
Συνολικό κόστος παρέμβασης (€/m ²)	95	40
Επιφάνεια εφαρμογής (m ²)	793,06	793,06
Συνολικό κόστος επένδυσης (€)	75.341	31.722

Πίνακας 7: Κόστος επένδυσης για Στοκχόλμη

Θερμομονωτικό υλικό παρέμβασης	Va-Q-vip B	Ισοδύναμη συμβατική θερμομόνωση
Πάχος υλικού (mm)	15	90
Κόστος υλικού (€/m ²)	90	30
Κόστος τοποθέτησης (€/m ²)	20	15
Συνολικό κόστος παρέμβασης (€/m ²)	110	45
Επιφάνεια εφαρμογής (m ²)	793,06	793,06
Συνολικό κόστος επένδυσης (€)	87.237	35.688

4.4.2. Κόστος Λειτουργίας

Το είδος καυσίμου καθώς και η τιμή του για τις υπό μελέτη πόλεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, ενδεικτικά για την τρέχουσα χρονιά καθώς και την τελευταία χρονιά της μελέτης.

Πίνακας 8: Κόστος Καυσίμου για τις 4 πόλεις

Πόλη	Καύσιμο	Τιμή Καυσίμου 2018 [€/kWh]	Τιμή Καυσίμου 2047 [€/kWh]
Θεσσαλονίκη	Φυσικό Αέριο	0,05	0,118
Λευκωσία	Πετρέλαιο	0,077	0,180
Βερολίνο	Φυσικό Αέριο	0,065	0,153
Στοκχόλμη	Φυσικό Αέριο	0,104	0,245

Το συνολικό κόστος λειτουργίας που αφορά τη θέρμανση του κτιρίου για την περίοδο των 30 ετών που μελετάται, για τις 4 πόλεις παρουσιάζεται στον Πίνακα 9. Σημειώνεται ότι, στο κόστος λειτουργίας έχει συνυπολογισθεί η επίδραση της αύξησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των Θ.Π.Κ., κατά την διάρκεια των τριάντα χρόνων. Η αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επιφέρει αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, η οποία έχει υπολογισθεί αναλυτικά για την υπό μελέτη περίοδο των τριάντα χρόνων.

Πίνακας 9: Συνολικό κόστος λειτουργίας για τις 4 πόλεις

Πόλη	Θ.Π.Κ. Συνολικό κόστος λειτουργίας [€]	Συμβατική Λύση Συνολικό κόστος λειτουργίας [€]
Θεσσαλονίκη	154.340	152.525
Λευκωσία	87.192	85.764
Βερολίνο	420.080	415.885
Στοκχόλμη	786.188	781.482

4.4.3. Κόστος Κύκλου Ζωής (L.C.C.)

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει το συνολικό Κόστος Κύκλου Ζωής για την κάθε πόλη (Πίνακας 10). Όπως φαίνεται, η λύση των Θ.Π.Κ. είναι αισθητά πιο ακριβή σε σχέση με την συμβατική θερμομόνωση, συνεπώς με οικονομικούς όρους δεν αποτελεί καλύτερη εναλλακτική.

Πίνακας 10: Κόστος Κύκλου Ζωής (L.C.C.) για τις 4 πόλεις

Πόλη	Θ.Π.Κ. Κόστος Κύκλου Ζωής [€]	Συμβατική Λύση Κόστος Κύκλου Ζωής [€]
Θεσσαλονίκη	229.681	184.248
Λευκωσία	162.533	117.487
Βερολίνο	495.421	447.608
Στοκχόλμη	873.425	817.170

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, αξιολογήθηκαν ενεργειακά και οικονομικά τα Θ.Π.Κ. για την εφαρμογή τους σε υφιστάμενα κτίρια για τέσσερις πόλεις της Ευρώπης με διαφορετικές

κλιματολογικές συνθήκες, τη Θεσσαλονίκη, τη Λευκωσία, το Βερολίνο και τη Στοκχόλμη. Με αυτόν τον τρόπο καλύφθηκε ένα μεγάλο εύρος κλιματολογικών συνθηκών για την μελέτη της συμπεριφοράς και της επίδρασης των θερμομονωτικών πάνελ κενού στη λειτουργία του κτιρίου. Το πάχος των θερμομονωτικών πάνελ κενού που εφαρμόστηκε σε κάθε περίπτωση, ήταν το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις των εθνικών νομοθεσιών. Τα αποτελέσματα της δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης έδειξαν πως η εφαρμογή των θερμομονωτικών πανέλων κενού στα υφιστάμενα κτίρια, επιφέρει μειώσεις της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση από 9 έως 21%, ενώ, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν επηρεάζει επί της ουσίας την κατανάλωση για ψύξη. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση της σταδιακής αύξησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ [$W/(m \cdot K)$] των Θ.Π.Κ. στις καταναλώσεις των κτιρίων σε βάθος τριακονταετίας, που οδηγούν σε αυξήσεις της τάξης του 3-8%. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στην περίπτωση της Λευκωσίας με ένα ποσοστό 8%, ενώ η μικρότερη στην περίπτωση της Στοκχόλμης με 3%. Στην Θεσσαλονίκη και στο Βερολίνο παρατηρήθηκε αύξηση 6% και 5% αντίστοιχα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων με τη μέθοδο της ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής, συγκρίνοντας τα σενάρια εφαρμογής θερμομονωτικών πανέλων κενού και συμβατικής θερμομόνωσης σε κάθε μία πόλη. Προέκυψε ότι τα θερμομονωτικά πάνελ κενού αποτελούν μια θερμομονωτική λύση με αρκετά πιο υψηλό κόστος από τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά, κόστος που μπορεί να είναι αποτρεπτικό.

Ωστόσο, πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας, προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην εξοικονόμηση χώρου, που ειδικά στα υφιστάμενα κτίρια είναι πολλές φορές κρίσιμος παράγοντας. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Στοκχόλμης όπου θα πρέπει να τοποθετηθούν 9 cm συμβατικής θερμομόνωσης ώστε να προκύψουν οι ίδιες καταναλώσεις με τα θερμομονωτικά πάνελα να απαιτούν 1,5 cm. Εάν συνυπολογιστεί και το μεγάλο πάχος της ήδη υφιστάμενης κατασκευής της τοιχοδομής, με 10 cm συμβατικού θερμομονωτικού υλικού και 30 cm τοιχοποιίας, γίνεται αντιληπτό ότι με το συμβατικό υλικό υπερβαίνει κανείς τα 50 cm πάχους, διάσταση που μπορεί να είναι αποτρεπτική. Στο βαθμό που τα θερμομονωτικά πάνελα μπορέσουν να παραχθούν με μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη διάρκεια της απόδοσής τους, θα είναι μια πραγματικά ενδιαφέρουσα εναλλακτική τεχνολογία θερμομόνωσης, για κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission, Energy, 2030 Energy Strategy, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy> , [Ημερομηνία πρόσβασης στην ιστοσελίδα: 24/10/2017]
- [2] European Commission, Energy, Buildings, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> , [Ημερομηνία πρόσβασης στην ιστοσελίδα: 24/10/2017]
- [3] Tenpierik, M. J., Cauberg, J. J., Thorsell, T. I., 2007, "Integrating vacuum insulation panels in building constructions: an integral perspective", *Construction Innovation*, 7(1), pp. 38-53.
- [4] Wang, X., Walliman, N., Ogden, R., Kendrick, C., 2007, "VIP and their applications in buildings: a review", *Proc. of the Institution of Civil Engineers Construction Materials* 160 (CM4), pp. 145–153, doi: 10.1680/coma.2007.160.4.145
- [5] Schiavoni, S., D' Alessandro, F., Bianchi, F., Asdrubali, F., 2016, "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, pp. 988–1011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- [6] Alotaibi, S. S., Riffat, S., 2014, "Vacuum insulated panels for sustainable buildings: a review of research and applications", *International Journal of Energy Research*, 38(1), pp. 1-19.
- [7] Torgal, F. P., Buratti, C., Kalaiselvam, S., Granqvist, C. G., Ivanov, V. (Eds.), 2016, *Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency*. Springer.
- [8] Kalnæs, S. E., Jelle, B. P., 2014, "Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways", *Applied Energy*, 116, pp. 355-375.
- [9] Alam, M., Singh, H., Limbachiya, M. C., 2011, "Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry—A review of the contemporary developments and future directions", *Applied energy*, 88(11), pp. 3592-3602.
- [10] Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann U., Schwab, H., Cauberg, H., Tenpierik, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M., Nussbaumer, B., 2005, "Vacuum Insulation in the Building Sector .Systems and Applications (Subtask B)", IEA/ECBCS Annex 39 High Performance Thermal Insulation (HiPTI) , http://www.ecbcs.org/docs/Annex_39_Report_Subtask-B.pdf
- [11] Brunner, S., Simmler, H., 2008, "In situ performance assessment of vacuum insulation panels in a flat roof construction", *Vacuum* 82(7), pp. 700-707.
- [12] Pär J., 2012, "Vacuum Insulation Panels in Buildings, Literature review", Report in Building Physics, Chalmers University of Technology.
- [13] Nussbaumer, T., Bundi, R., Tanner, C., Muehlebach, H., 2005, "Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels", *Energy and Buildings*, 37(11), pp. 107-1113.

ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ: ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗ

Στ. Τσόκα, Κ. Τσικαλουδάκη*, Θ. Θεοδοσίου, Δ. Μπίκας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.

*e-mail: katgt@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας έχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του ισοζυγίου τελικής κατανάλωσης ενέργειας τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και εθνικό επίπεδο, καθώς μόνο τα κτίρια κατοικίας απορροφούν περίπου το 25% της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι στην Ελλάδα περίπου το 82% της επιφάνειας των κτιρίων έχει οικιστική χρήση και η συντριπτική πλειονότητα αυτών έχει δομηθεί πριν το 1980, άρα στερείται θερμομονωτικής προστασίας, γίνεται πολύ εύκολα αντιληπτό ότι οι δράσεις ενεργειακής αναβάθμισης του υπάρχοντος κτιριακού δυναμικού μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα αποδοτικές προς την κατεύθυνση των απαιτήσεων των ευρωπαϊκών οδηγιών για σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών ρύπων.

Προς αυτή την κατεύθυνση μελετάται στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου E2VENT ένα νέο σύστημα για την ενεργειακή αναβάθμιση πολυώροφων κτιρίων κατοικίας, το οποίο συνδυάζει τη θερμομονωτική προστασία με τον έλεγχο των απωλειών αερισμού με ειδικά σχεδιασμένο εναλλάκτη θερμότητας και την αποθήκευση θερμότητας σε υλικά αλλαγής φάσης. Το νέο αυτό σύστημα αποτελεί έναν εξελιγμένο τύπο δικέλυφης αεριζόμενης όψης και μέσα από τις επί μέρους αναλυτικές μελέτες που έχουν γίνει αποδεικνύεται ότι μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας σε υφιστάμενα κτίρια και μάλιστα σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Η πράξη όμως έχει δείξει ότι για να επιτευχθεί η ευρεία εφαρμογή ενός συστήματος θα πρέπει πάντα να εξετάζεται και η αποδοχή που μπορεί να έχει στην αγορά από τους μελλοντικούς χρήστες του, είτε αυτοί είναι οι τελικοί χρήστες των κτιρίων που πρόκειται να αναβαθμιστούν είτε οι μηχανικοί που πρόκειται να μελετήσουν και να κατασκευάσουν το έργο. Για το σκοπό αυτό εκπονήθηκε έρευνα κοινής γνώμης στην Ελλάδα και άλλες ευρωπαϊκές χώρες, η οποία απευθυνόταν σε ιδιώτες και μηχανικούς. Μέσω ειδικά διαμορφωμένων ερωτηματολογίων καταγράφηκαν πολύτιμες πληροφορίες για την άποψη που έχουν για το σύστημα, τις παραμέτρους που θα επηρέαζαν την απόφασή τους να το εφαρμόσουν σε μια μελλοντική ανακαίνιση του ακινήτου τους, τα επιθυμητά γι' αυτούς αποτελέσματα, κτλ. Για τους επαγγελματίες του κτιρίου ζητήθηκε επιπλέον η άποψή τους για τις αεριζόμενες όψεις γενικότερα και η εμπειρία τους σε ανάλογα έργα.

Στην προτεινόμενη εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της έρευνας. Φαίνεται ότι οι εν δυνάμει χρήστες του συστήματος είναι ιδιαίτερα θετικοί λόγω της υποσχόμενης υψηλής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, αλλά είναι επιφυλακτικοί με το κόστος του συστήματος, την απαίτηση για συντήρηση και τη χρήση του μηχανικού αερισμού.

Λέξεις Κλειδιά: ενεργειακή αναβάθμιση, αεριζόμενη όψη, κοινωνική αποδοχή, έρευνα κοινής γνώμης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό ποσοστό του ευρωπαϊκού κτιριακού δυναμικού έχει κατασκευαστεί πριν το 1960 και είναι ιδιαίτερα ενεργηβόρο, δεδομένου ότι στερείται θερμομονωτικής προστασίας και ενεργειακά αποδοτικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Ο μεγάλος αριθμός τέτοιων κτιρίων καθιστά την αναβάθμισή τους ως μια ιδιαίτερα αποτελεσματική στρατηγική για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η Ευρωπαϊκή Οδηγία του 2010, η οποία προέβλεπε μεταξύ άλλων τη θέσπιση απαιτήσεων από τα κράτη μέλη για τα νέα και τα υφιστάμενα κτίρια να ανακαινίζονται ριζικά. Ωστόσο, φαίνεται ότι η αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι το 2020 δεν θα υπερβαίνει το 18%, κι έτσι ο αρχικός στόχος εξοικονόμησης ενέργειας κατά 20% δεν επιτυγχάνεται [1]. Παρ' όλη την αδυναμία των κρατών μελών να ανταποκριθούν στην πρόκληση της Ευρώπης 2020, ο Ευρωπαϊκός οδικός χάρτης για την ενέργεια ορίζει ακόμη πιο αυστηρές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2050 κατά 80%-95% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 [2].

Για να μπορέσει ο κτιριακός τομέας να ανταπεξέλθει σε αυτή την πρόκληση θα πρέπει να βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό την ενεργειακή του απόδοση, εφαρμόζοντας νέες τεχνολογίες υψηλής απόδοσης τόσο σε επίπεδο κελύφους όσο και στα συστήματά του. Αναμφίβολα, απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών είναι καταρχήν η αποδοχή τους από τους δυνητικούς αποδέκτες, ξεκινώντας από τους μηχανικούς που θα τις μελετήσουν και θα τις ενσωματώσουν στα κτίρια και φτάνοντας μέχρι τους τελικούς χρήστες των κτιρίων.

Η εξέταση των παραγόντων που διαμορφώνουν την κοινωνική αποδοχή του νέου, καινοτόμου συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης E2VENT, το οποίο αναπτύσσεται στο πλαίσιο ερευνητικού έργου χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η αναγνώρισή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ενίσχυση της διάχυσης του συστήματος στην αγορά, αλλά και της επιτυχημένης εφαρμογής του στα κτίρια. Ακριβώς γι' αυτό το λόγο αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης ήδη από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού του συστήματος.

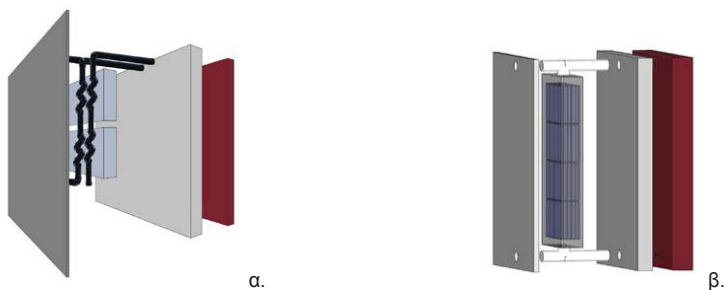
Πρέπει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία ένας σημαντικός αριθμός εργασιών ασχολείται με τη στάση της κοινωνίας απέναντι στα συστήματα που στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές επικεντρώνονται στις εφαρμογές συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [3-6] και όχι σε συστήματα όψεων, όπως το E2VENT.

1.1. Το σύστημα E2VENT

Το νέο σύστημα ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων αναπτύσσεται στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου E2VENT, το οποίο χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Ορίζοντας 2020 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Στο ερευνητικό έργο συμμετέχουν 13 εταίροι που προέρχονται κυρίως από τον τριτογενή τομέα. Ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2015 και πρόκειται να ολοκληρωθεί τον Ιούνιο του 2018. Μέσα σε αυτή την περίοδο των 42 μηνών, αναπτύχθηκε το σύστημα, έγιναν πιλοτικές εφαρμογές και η προετοιμασία για τη διάθεσή του στην αγορά.

Το αναπτυσσόμενο σύστημα E2VENT αποτελεί μια λύση ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων, η οποία κατά κύριο λόγο στοχεύει στον περιορισμό των θερμικών απωλειών από αγωγιμότητα και αερισμό, καθώς και περιορισμό των ψυκτικών φορτίων με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Συμπεριλαμβάνει (σχήμα 1) εναλλάκτη θερμότητας, μονάδα αποθήκευσης θερμότητας που λειτουργεί με υλικά αλλαγής φάσης, «έξυπνο» σύστημα διαχείρισης των μονάδων και μια δικέλυφη όψη, η οποία ενσωματώνει τα παραπάνω συστήματα και τη θερμομονωτική προστασία.

Το σύστημα E2VENT προορίζεται σε πολυώροφα κτίρια με χρήση κατοικίας της περιόδου 1960-1970, τα οποία χαρακτηρίζονται από απουσία ή ανεπάρκεια θερμομονωτικής προστασίας και κακή ποιότητα εσωτερικού αέρα λόγω της απουσίας μηχανικού αερισμού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ευρωπαϊκού προγράμματος Tabula [7], ένα σημαντικό τμήμα του κτιριακού δυναμικού των μεσογειακών χωρών ανεγέρθηκε αυτή την περίοδο, πριν από την εφαρμογή εθνικών κανονισμών για τη θερμομονωτική προστασία ή την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Σε αυτό το πλαίσιο, το σύστημα E2VENT συμβάλλει στη βελτίωση των εσωκλιματικών συνθηκών και της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου, καθώς οι προκαταρκτικές μελέτες έδειξαν ότι η εφαρμογή του σε υφιστάμενο κτίριο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας κατά 40%.



Σχήμα 1. Το σύστημα E2VENT με τον εναλλάκτη θερμότητας (α) και το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (β).

Ανεξαρτήτως όμως της απόδοσης του συστήματος και της θετικής συνεισφοράς του στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, η εισαγωγή και η ευρεία διάδοσή του στην αγορά προϋποθέτει την αποδοχή του από τους τελικούς αποδέκτες και επιβάλλει τον εντοπισμό των πιθανών κοινωνικών φραγμών. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε με προσοχή από τα πρώτα κιόλας στάδια εκπόνησης του ερευνητικού έργου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η διερεύνηση της αποδοχής του συστήματος E2VENT από τους δυνητικούς χρήστες του έγινε μέσω έρευνας κοινής γνώμης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέθοδος αυτή επιτρέπει να ληφθούν υπόψη οι απόψεις πολλών ανθρώπων με διαφορετικό υπόβαθρο, βελτιώνοντας έτσι την αντικειμενικότητα και την αξιοπιστία του δείγματος [4].

Βασικό μέλημα κατά την ανάπτυξη του ερωτηματολογίου ήταν να διασφαλιστεί η συλλογή της απαιτούμενης πληροφορίας με όσο το δυνατό πιο απλό και σύντομο τρόπο. Για το σκοπό αυτό λήφθηκαν υπόψη και άλλες αντίστοιχες μελέτες που έγιναν στο παρελθόν. Δεδομένου ότι η έρευνα αφορά σε όλους όσοι λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία επιλογής και χρήσης του συστήματος, ανεξαρτήτως του εκπαιδευτικού ή επαγγελματικού υποβάθρου τους, και άρα του βαθμού αντίληψης της λειτουργίας του συστήματος, αναπτύχθηκαν δύο τύποι ερωτηματολογίου που απευθύνονται στις κύριες ομάδες στόχους: τους δυνητικούς τελικούς χρήστες και τους επαγγελματίες από τον τεχνικό κόσμο.

2.1. Ερωτηματολόγιο για δυνητικούς τελικούς χρήστες

Το ερωτηματολόγιο που απευθύνεται στους δυνητικούς τελικούς χρήστες του συστήματος διαρθρώνεται σε τέσσερα μέρη:

- Στο πρώτο μέρος καταγράφονται προσωπικά στοιχεία του συμμετέχοντα, όπως η ηλικία και το φύλο, καθώς και πληροφορίες για την κύρια κατοικία του, όπως το ιδιοκτησιακό καθεστώς, η τοποθεσία της και η τυπολογία της.
- Το δεύτερο μέρος αφορά στο γενικότερο πλαίσιο της ευαισθησίας του συμμετέχοντα σε περιβαλλοντικά θέματα και στη γνώση του σχετικά με τις ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες.
- Στο τρίτο μέρος ο ερωτώμενος αξιολογεί τις παραμέτρους που είναι καθοριστικές για τη λήψη απόφασης σχετικά με την επιλογή ενός συστήματος ανακαίνισης κτιρίων. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται η κλίμακα από 1 έως 5, με το 1 να αναφέρεται σε παραμέτρους που θεωρούνται ασήμαντες και το 5 σε πολύ σημαντικές. Οι παράμετροι που αξιολογούνται είναι:
 - η αισθητική της όψης,
 - η τρωτότητα της όψης (π.χ. σε διάβρωση, φθορά, αλλοίωση χρωμάτων, κτλ.),
 - η πυροπροστασία,
 - η θερμομονωτική προστασία,
 - η συμπεριφορά έναντι της υγρασίας,

- η ακουστική,
 - η βελτίωση και ο έλεγχος της ποιότητας εσωτερικού αέρα,
 - η ταχύτητα και η ευκολία κατασκευής,
 - η ενεργειακή απόδοση,
 - ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος,
 - το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του συστήματος,
 - το κόστος και η ευκολία συντήρησης.
- Το τέταρτο μέρος σκιαγραφεί την προοπτική επιλογής του συγκεκριμένου συστήματος από το δυνητικό χρήστη. Στο σημείο αυτό καταγράφεται και η προθυμία του χρήστη να αντικαταστήσει το φυσικό αερισμό με μηχανικό, προς όφελος της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης του λειτουργικού κόστους της κατοικίας του.

2.2. Ερωτηματολόγιο για τους επαγγελματίες

Το ερωτηματολόγιο που απευθύνεται στον τεχνικό κόσμο αποτελείται από τρία μέρη:

- Στο πρώτο μέρος καταγράφονται προσωπικές πληροφορίες του συμμετέχοντα, όπως η ηλικία, το φύλλο, η ειδικότητά του και ενδεχόμενη εμπειρία σε έργα ανακαίνισης κτιρίων
- Στο δεύτερο μέρος καταγράφεται η βούληση του συμμετέχοντα να χρησιμοποιήσει το σύστημα σε ένα μελλοντικό έργο ανακαίνισης κτιρίων μέσω της αξιολόγησης των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Στο τρίτο μέρος καταγράφεται η άποψη του συμμετέχοντα για τις δικέλυφες αεριζόμενες όψεις και η εμπειρία που έχει με την εφαρμογή τους.

Και τα δύο ερωτηματολόγια αναπτύχθηκαν στην πλατφόρμα google survey, αρχικά στην αγγλική γλώσσα, και στη συνέχεια στα Ισπανικά, στα Γαλλικά, στα Ιταλικά και στα ελληνικά, ώστε να διασφαλιστεί η διάχυσή τους στις μεσογειακές χώρες και να αυξηθεί ο αριθμός των απαντήσεων. Η γνωστοποίηση της έρευνας στους δυνητικούς τελικούς χρήστες του συστήματος έγινε μέσω των κοινωνικών δικτύων και με προσωπικές επαφές, ενώ τα ερωτηματολόγια των επαγγελματιών διαχύθηκαν στον τεχνικό κόσμο κυρίως μέσω των τεχνικών επιμελητηρίων και των συλλόγων μηχανικών. Η συλλογή των ερωτηματολογίων ξεκίνησε το Μάρτιο του 2015 και διήρκεσε μέχρι τον Ιούνιο του 2015 και συνολικά αποκρίθηκαν 437 άτομα από την ομάδα των δυνητικών τελικών χρηστών και 550 άτομα από την ομάδα των επαγγελματιών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας για τους δυνητικούς τελικούς χρήστες και για τους επαγγελματίες.

3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΥΝΗΤΙΚΟΥΣ ΤΕΛΙΚΟΥΣ ΧΡΗΣΤΕΣ

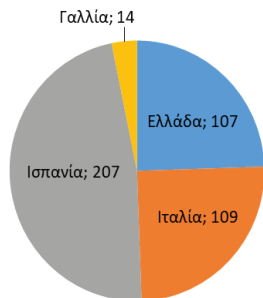
Όπως φαίνεται στο σχήμα 2, οι περισσότεροι συμμετέχοντες ανήκουν στις ηλικιακές ομάδες 25-34 και 35-44 και μόλις 5% στην ηλικιακή ομάδα 55-65. Αυτό αποδίδεται κυρίως στον ηλεκτρονικό τρόπο διάχυσης του ερωτηματολογίου που ενδεχομένως δυσχέρανε την πρόσβαση και τη συμπλήρωσή του από μεγαλύτερα σε ηλικία άτομα. Σύμφωνα με το σχήμα 3, το 78% των ερωτηθέντων κατοικεί σε αστικές περιοχές και από αυτούς το 70% σε ιδιόκτητο διαμέρισμα πολυκατοικίας. Μόνο το 2% των ερωτηθέντων που ζει σε αστική περιοχή διαμένει σε μονοκατοικία.

Για τη σκιαγράφηση του υποβάθρου των ερωτηθέντων σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα, το ερωτηματολόγιο περιελάμβανε ερωτήσεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή, το ενεργειακό ζήτημα και τη γνώση των ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών. Η συντριπτική πλειονότητα των ερωτηθέντων δείχνει μεγάλη προθυμία να αναλάβει δράσεις για τη βελτίωση του περιβάλλοντος, καθώς αναγνωρίζει τη σημασία του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.

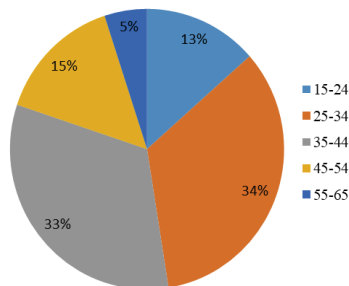
Προς την κατεύθυνση αυτή (σχήμα 4), το 53% των ερωτηθέντων θεωρεί τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς της κατοικίας του ως πολύ σημαντική και το 33% ως σημαντική. Ωστόσο, μόνο το 37% των ερωτηθέντων είναι κάπως εξοικειωμένο και το 17% αρκετά εξοικειωμένο με τις ενεργειακά

αποδοτικές τεχνολογίες. Το 27% δεν γνωρίζει καθόλου τα διαθέσιμα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την ενεργειακή αναβάθμιση ενός κτιρίου, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ενημέρωση του κοινού μπορεί πραγματικά να συμβάλει προς την υιοθέτηση πιο φιλικών προς το περιβάλλον δράσεων.

Αριθμός ερωτηματολογίων

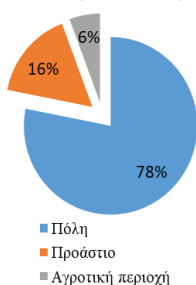


Ηλικιακή ομάδα ερωτηθέντων

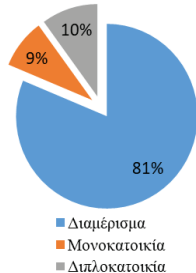


Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά του δείγματος από την ομάδα των δυνητικών τελικών χρηστών.

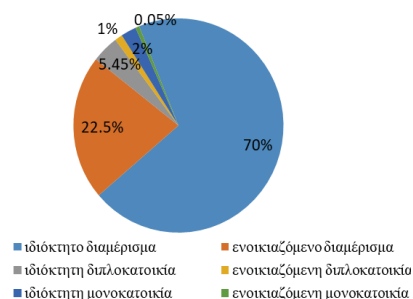
Θέση κατοικίας



Τύπος κατοικίας

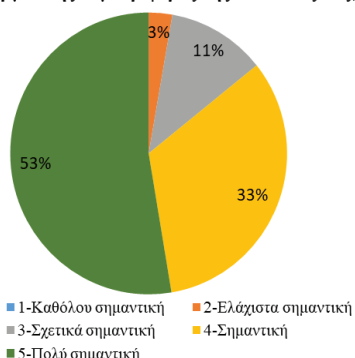


Ιδιοκτησιακό καθεστώς (αστικές περιοχές)

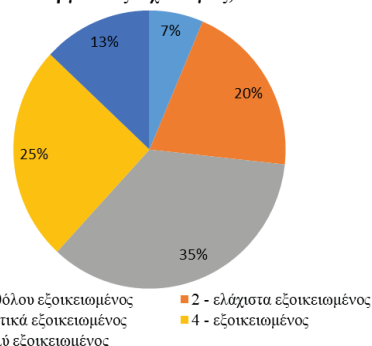


Σχήμα 3. Η περιοχή, ο τύπος και το ιδιοκτησιακό καθεστώς της κατοικίας των ερωτηθέντων.

Πόσο σημαντική είναι για εσάς η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς της κατοικίας σας;



Είστε εξοικειωμένοι με τις διαθέσιμες ενεργειακές τεχνολογίες;



Σχήμα 4. Στάση των ερωτηθέντων για τη σημασία της ενεργειακής θωράκισης των κατοικιών και την εξοικείωσή τους με τις διαθέσιμες ενεργειακές τεχνολογίες.

Στη συνέχεια διερευνάται η αντίληψη των δυνητικών χρηστών για το σύστημα E2VENT ως μέτρο αναβάθμισης κτιρίων κατοικίας. Όπως τόνισαν οι Assefa and Frostell [8], η αντίληψη των χρηστών περιλαμβάνει τη στάση που διαμορφώνεται αφού πρώτα αποκτηθεί και αναλυθεί η σχετική πληροφορία. Στην προκειμένη περίπτωση, ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να μελετήσει μια σύντομη περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος, μέσω ενός συνδέσμου που δόθηκε στην αρχή του ερωτηματολογίου. Εξετάστηκε η άποψη των ερωτηθέντων για 12 παραμέτρους που επηρεάζουν την επιλογή ενός συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης όπως το E2VENT, με κλίμακα σημαντικότητας από το 1 (λιγότερο σημαντικό) έως το 5 (πολύ σημαντικό). Η διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων εμφανίζεται στο σχήμα 5.

Το υψηλότερο ποσοστό των ερωτηθέντων (80%) θεωρεί ότι η αντιμετώπιση της υγρασίας και η αποτροπή της διείσδυσης νερού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, όπως και η θερμομονωτική προστασία (78%), η ενεργειακή απόδοση του συστήματος (64%), η συντήρηση (64%) και το κόστος αγοράς και εγκατάστασης (53%). Η αισθητική και η τρωτότητα της κατασκευής θεωρούνται πολύ σημαντικές παράμετροι για περίπου το 44% των ερωτηθέντων.

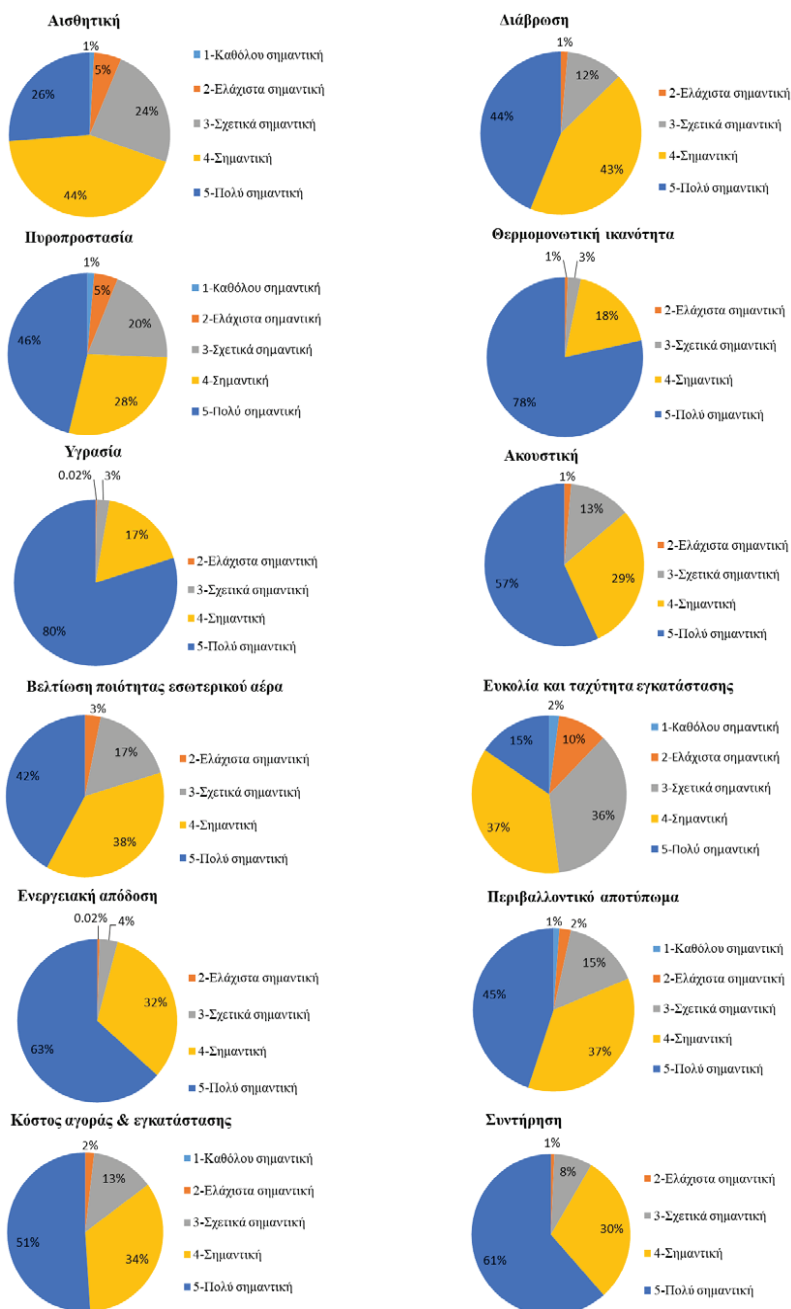
Ωστόσο, όταν ζητήθηκε η ιεραρχική κατάταξη των παραμέτρων αυτών, οι χρήστες επέλεξαν τη θερμομονωτική προστασία ως την πιο σημαντική με δεύτερη τη διαχείριση της υγρασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε οι χρήστες εκλαμβάνουν έναν πιθανό κίνδυνο, όπως π.χ. η διείσδυση της υγρασίας, περισσότερο ως έναν πολύ καθοριστικό παράγοντα κατά τη λήψη της απόφασής τους, παρά ως εμπόδιο για την εφαρμογή του συστήματος. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην ελλιπή πληροφόρηση που αυξάνει το φόβο και εκφράζεται ως δισταγμός απέναντι σε μια νέα τεχνολογία.

Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορετική τάση που εμφανίζεται στα αποτελέσματα μεταξύ της ξεχωριστής αξιολόγησης κάθε παραμέτρου και του ορισμού μιας ως την πιο σημαντική ερμηνεύεται από τον τρόπο που εκφράστηκαν οι ερωτήσεις. Στην πρώτη περίπτωση, οι χρήστες πρέπει να αξιολογήσουν τις παραμέτρους ως προς το βαθμό σημαντικότητάς τους, ενώ στη δεύτερη περίπτωση πρέπει με πιο άμεσο και ευθύ τρόπο να χαρακτηρίσουν μία εξ αυτών ως την πιο σημαντική. Γι αυτό και η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει από τη βελτιωμένη θερμομονωτική προστασία και τη συμπεριφορά έναντι της υγρασίας γίνονται οι πιο καθοριστικές παράμετροι και αφήνουν πίσω την αισθητική, την ηχοπροστασία και την τρωτότητα. Σε αντίστοιχο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Moulia et al. [4] στην εργασία τους, στην οποία τόνισαν ότι ο τρόπος διατύπωσης και οι σωστές επιλογές απαντήσεων στις ερωτήσεις της φόρμας είναι πολύ σημαντικές για τη διενέργεια μιας έρευνας.

Όσον αφορά στον κυριότερο παράγοντα που θα απέτρεπε ένα δυνητικό χρήστη από την επιλογή του συστήματος, το 40% ανέφερε το υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης, και μόλις το 6% θα θεωρούσε την υγρασία ως αποτρεπτικό παράγοντα. Η αλλαγή στην εμφάνιση της όψης θα παρεμπόδιζε την επιλογή του συστήματος για το 16% των ερωτηθέντων, ενώ το 11% δεν θα το επέλεγε εάν η συντήρησή του ήταν κοστοβόρα και δύσκολη.

Ωστόσο, ο φόβος των δυνητικών τελικών χρηστών για αυξημένο κόστος μπορεί να απομακρυνθεί με την ποσοτικοποίηση της αναμενόμενης εξοικονόμησης ενέργειας και τα συνεπακόλουθα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Μάλιστα, οι Zoellner et al. [6] θεωρούν πως όταν ένα σύστημα θεωρείται οικονομικά αποδοτικό, η συνολική αντίληψη γι' αυτό και κατ' επέκταση η αξιολόγησή του είναι θετικότερη. Επομένως, η σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους των κατοικιών μέσω της ενεργειακής τους αναβάθμισης μπορεί να αποτελέσει το κυρίαρχο επιχείρημα κατά τη διαμόρφωση πολιτικής και στρατηγικών που θα αντισταθμίσει το δισταγμό απέναντι στη νέα τεχνολογία.

Ειδικότερα για το E2VENT καταγράφηκε ότι περίπου οι μισοί ερωτηθέντες είναι σχετικά πρόθυμοι και μόλις 7% αρκετά πρόθυμοι να επενδύσουν σε αυτό. Οι απαντήσεις αυτές δείχνουν το δισταγμό του κοινού που ερμηνεύεται από το χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης και αμεροληψίας απέναντι σε μία καινοτομική ενεργειακή τεχνολογία. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, σημαντική θα είναι η συμβολή της ενημέρωσης των ενδιαφερομένων για τη λειτουργία του, αλλά και για τα προσδοκώμενα οφέλη από την εφαρμογή του. Σύμφωνα με τον Kyung-Hee [9] οι τοπικές αρχές μπορούν να διαδραματίσουν έναν καθοριστικό ρόλο προς αυτή την κατεύθυνση, μέσω της ανάδειξης της ανάγκης για ενεργειακές αναβαθμίσεις κτιρίων και την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών. Η ενεργή ενασχόληση και η υποστήριξη των τοπικών αρχών στη διαδικασία υποστήριξης των καινοτομικών ενεργειακών συστημάτων ενισχύει σημαντικά την κοινωνική αποδοχή τους [6]. Σε αυτό το πλαίσιο, θα πρέπει να σχεδιαστούν καμπάνιες πληροφόρησης, εξατομικευμένες για τις ομάδες στόχους των δυνητικών τελικών χρηστών. Επιπλέον, η ενθάρρυνση από το κράτος μέσω κάποιου είδους οικονομικών κινήτρων μπορεί να καταστήσει το προτεινόμενο σύστημα πολύ ελκυστικό και επιτυχές.



Σχήμα 5. Η απόκριση των ερωτηθέντων για τη σημαντικότητα των παραμέτρων που καθορίζουν την επιλογή του συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης.

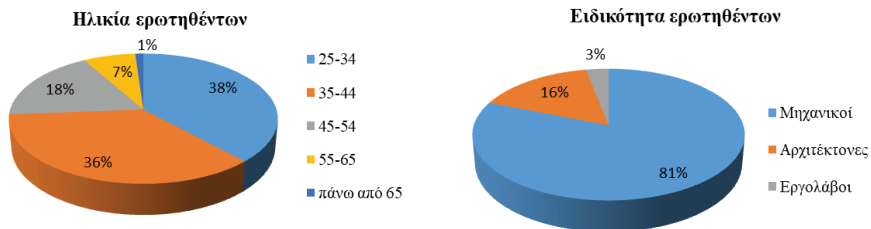
Καθώς το σύστημα E2VENT περιλαμβάνει και εναλλάκτη θερμότητας για μηχανικό αερισμό, οι δυνητικοί τελικοί χρήστες ερωτήθηκαν κατά πόσο θα μπορούσαν να αλλάξουν τις συνήθειές τους ως προς το φυσικό αερισμό. Περισσότεροι από τους μισούς (54%) είναι διατεθειμένοι να εφαρμόσουν μηχανικό αερισμό, εάν προέκυπτε ενεργειακό όφελος. Ειδικότερα, το 52% αυτών που είναι σχετικά πρόθυμοι να επενδύσουν σε μια νέα ενεργειακή τεχνολογία, είναι θετικοί στην εφαρμογή του μηχανικού αερισμού, ενώ το 48% όχι. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν το λεγόμενο χάσμα αξιών-ανάληψης δράσης (value-action gap) που έχει περιγραφεί σε πολλές μελέτες [10-11]. Παρ' όλη την ευαισθητοποίηση σε θέματα κλιματικής αλλαγής και ενεργειακών τεχνολογιών, οι δυνητικοί χρήστες είναι μάλλον απρόθυμοι να αλλάξουν τις συνήθειές τους. Στην παρούσα μελέτη καταγράφηκε με διαφορετικό τρόπο το χάσμα αξιών-ανάληψης δράσης ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Εμφανίστηκε περισσότερο έντονο στις Μεσογειακές περιοχές, με το ήπιο κλίμα και την εξωστρέφεια των κατοίκων, για τους οποίους το άνοιγμα των κουφωμάτων αποτελεί βασικό στοιχείο της καθημερινότητας και της νοοτροπίας τους, γεγονός που θα καθιστούσε τη χρήση μηχανικού αερισμού ως μια δραστηριότητα αλλαγή στις συνήθειές τους.

3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΕΣ

Συνολικά 550 άτομα απάντησαν στο ερωτηματολόγιο για τον τεχνικό κόσμο, το 38% και το 36% των οποίων ανήκουν στην ηλικιακή ομάδα 25-34 και 35-44 αντίστοιχα (σχήμα 6). Όπως συνέβη και με τους δυνητικούς χρήστες, η μικρή συμμετοχή ατόμων με ηλικία πάνω από 65 ετών οφείλεται στον ηλεκτρονικό τρόπο λήψης του ερωτηματολογίου.

Το 81% των ερωτηθέντων είναι μηχανικοί, εκ των οποίων 58% πολιτικοί μηχανικοί, 14% μηχανολόγοι μηχανικοί και 7% ηλεκτρολόγοι μηχανικοί, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αποτελούνταν από μηχανικούς άλλων ειδικοτήτων, όπως χημικούς και μεταλλειολόγους μηχανικούς, καθώς και μηχανικούς υπολογιστών και ενέργειας. Οι αρχιτέκτονες αντιστοιχούν στο 3% του δείγματος.

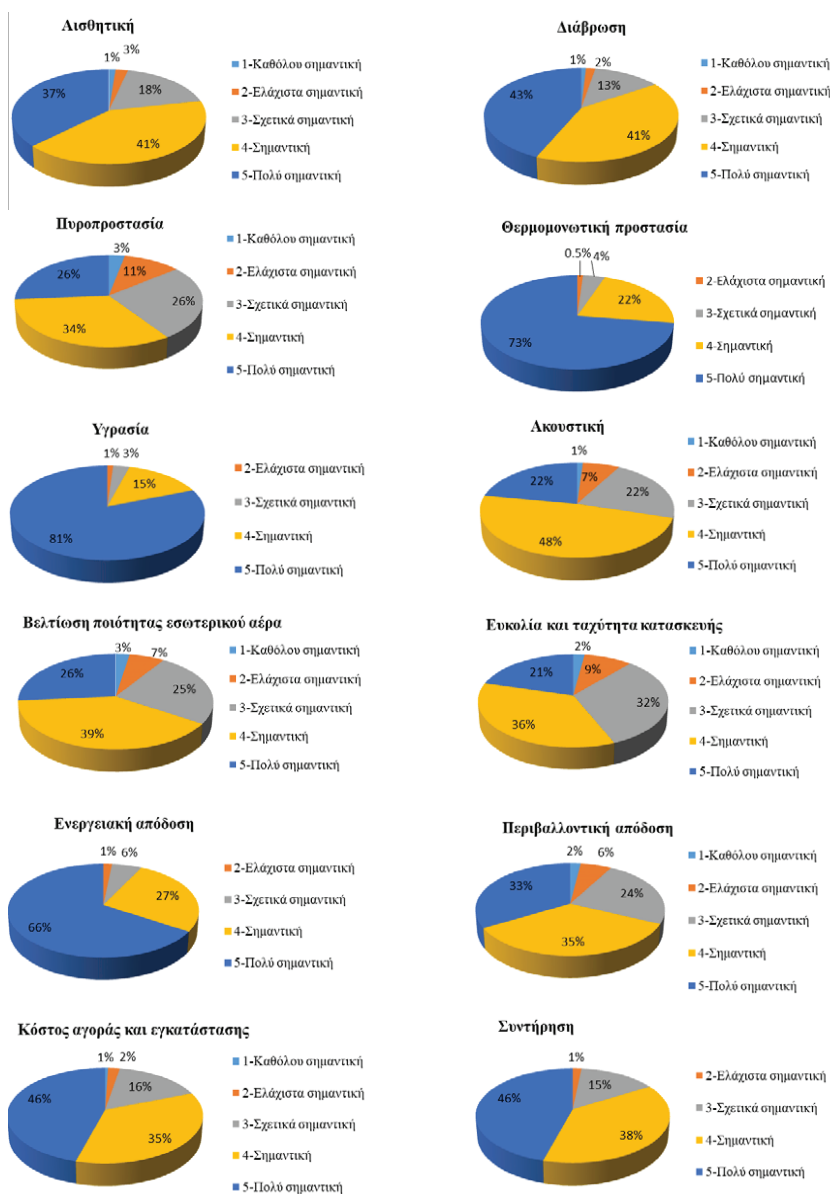
Το 68% των επαγγελματιών έχουν εμπειρία σε έργα ανακαίνισης κτιρίων. Από αυτούς, το 46% είναι πολιτικοί μηχανικοί, 17% αρχιτέκτονες και το 13% μηχανολόγοι μηχανικοί.



Σχήμα 6. Χαρακτηριστικά του δείγματος από την ομάδα των επαγγελματιών.

Κατά την αξιολόγηση των 12 παραμέτρων ως προς τη σημαντικότητά τους κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση ενός κτιρίου (σχήμα 7), οι απαντήσεις δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτές της ομάδας των δυνητικών χρηστών. Η διαχείριση της υγρασίας θεωρείται ως πολύ σημαντική παράμετρος (81%), όπως και η αποδοτικότητα της θερμομονωτικής προστασίας (73%) και η ενεργειακή απόδοση (66%).

Όμως, κατά την ιεραρχική κατάταξη των παραπάνω παραμέτρων, οι επαγγελματίες επέλεξαν τη θερμομονωτική προστασία και την ενεργειακή απόδοση ως τις πιο κρίσιμες παραμέτρους για την επιλογή του συστήματος σε κάποιο δυνητικό έργο ανακαίνισης κτιρίων που θα εμπλακούν. Σε αντίθεση με τους δυνητικούς τελικούς χρήστες, μόνο ένα 5% των επαγγελματιών θεωρεί τη διαχείριση της υγρασίας ως τον πιο καθοριστικό παράγοντα, καθώς οι περισσότεροι γνωρίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Ενδεχόμενο υψηλό κόστος αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης θα αποτελούσε τον κυρίαρχο αποτρεπτικό παράγοντα για την εφαρμογή του συστήματος σε μια μελλοντική ενεργειακή αναβάθμιση.



Σχήμα 7. Η απόκριση των ερωτηθέντων για τη σημαντικότητα των παραμέτρων που καθορίζουν την επιλογή του συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης.

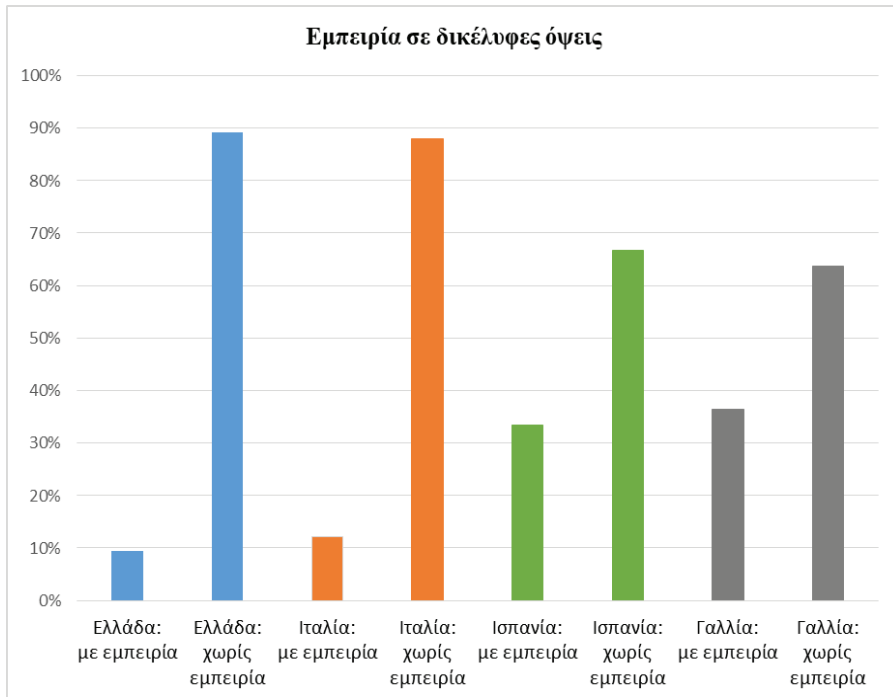
Σύμφωνα με δήλωση των ερωτηθέντων, μόλις το 13% έχει εμπειρία με τις αεριζόμενες προσόψεις και το 73% θα τις χρησιμοποιούσε σε ένα μελλοντικό έργο ενεργειακής αναβάθμισης.

Η μικρή εμπειρία των ερωτηθέντων σε αεριζόμενες προσόψεις ερμηνεύεται:

- από τα χαρακτηριστικά της ευρωπαϊκής αγοράς στο συγκεκριμένο πεδίο. Σύμφωνα με δεδομένα του 2013, η χρήση συστημάτων με πετάσματα στις όψεις των κτιρίων είναι λιγότερο

διαδεδομένη στην ανατολική και νότια Ευρώπη σε σχέση με την κεντρική και τη δυτική [12]. Αυτό είναι κυρίως απόρροια της τυπολογίας του δομημένου περιβάλλοντος που συναντάται στις περιοχές αυτές, όπως η παρουσία πολλών ιστορικών κτιρίων, η αναβάθμιση των οποίων δεν επιτρέπει αλλαγές στις όψεις τους.

- από τη μεγάλη συμμετοχή επαγγελματιών από την Ελλάδα, που αντιστοιχεί στο 60% του δείγματος, και τη μικρή έως σήμερα διείσδυση των συστημάτων όψεων στην ελληνική αγορά (σχήμα 8). Αυτή αποδίδεται στο υψηλότερο κόστος κατασκευής, στην έλλειψη εξειδικευμένης γνώσης που απαιτείται από τους τεχνίτες, τους κατασκευαστές και τους μελετητές, στην αδυναμία γρήγορης υιοθέτησης νέων και καινοτόμων πρακτικών στην κατασκευή, καθώς και στο υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο.



Σχήμα 8. Η εμπειρία των ερωτηθέντων από την ομάδα των επαγγελματιών στις δικέλυφες όψεις.

Ένας σημαντικός αριθμός ερωτηθέντων σημείωσε ότι ένα σημαντικό μειονέκτημα του συστήματος είναι το αυξημένο κόστος σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, όπως είναι η αναδρομική μόνωση. Επιπλέον, οι αυξημένες θερμογέφυρες λόγω της διακοπής της θερμομόνωσης από τα μπρακέτα στήριξης της όψης, μαζί με την αναγκαιότητα για σωστή εγκατάσταση και κατασκευή για την αποφυγή προβλημάτων υγρασίας αναφέρθηκαν ως μειονεκτήματα της λύσης. Στα πλεονεκτήματα του συστήματος, η πλειονότητα ανέδειξε τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, την υψηλή ενεργειακή απόδοση του συστήματος, καθώς και τη μείωση του αισθήματος δυσφορίας στον εσωτερικό χώρο.

Παρόλο που η πλειονότητα των ερωτηθέντων δεν διέθετε εμπειρία σε έργα ανακαίνισης κτιρίων με την εφαρμογή αεριζόμενων όψεων, ένα σημαντικό ποσοστό των ερωτηθέντων (73%) θα ήθελε να τις ενσωματώσει σε σχετικό έργο στο μέλλον. Οι περισσότεροι βέβαια διατύπωσαν την άποψη πως θα χρειαστούν περαιτέρω εκπαίδευση και ενημέρωση για το σύστημα, ώστε να μπορέσουν να πείσουν τους πελάτες τους για τα πλεονεκτήματα του συστήματος και τα προσδοκώμενα οφέλη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας μεγάλης κλίμακας που διενεργήθηκε στις χώρες της Νότιας Ευρώπης και στοχεύει στη διερεύνηση της κοινωνικής αποδοχής ενός νέου, καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων. Η έρευνα απευθύνεται με διαφορετικό τρόπο στους δυνητικούς τελικούς χρήστες του συστήματος και στους επαγγελματίες.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η πλειονότητα των ερωτηθέντων τελικών χρηστών του συστήματος, οι οποίοι είναι κατά κανόνα οι ιδιοκτήτες ενός διαμερίσματος σε πολυκατοικία, αναγνωρίζουν τη σημασία της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης της κατοικίας τους, όμως για να αποφασίσουν την εφαρμογή μιας καινοτομίας λύσης ενεργειακής αναβάθμισης θα ήθελαν να γνωρίζουν τον τρόπο λειτουργίας και τα οφέλη που απορρέουν από αυτήν. Οι κύριοι παράγοντες που θα επηρεάσουν την τελική τους επιλογή αφορούν στη συμπεριφορά του συστήματος ως προς την υγρασία, τη θερμομονωτική ικανότητα και την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης και υψηλές απαιτήσεις συντήρησης θα απέτρεπαν έναν δυνητικό χρήστη από την υιοθέτησή του. Επιπλέον, δεδομένου ότι το σύστημα E2VENT συμπεριλαμβάνει και εναλλάκτη θερμότητας για μηχανικό αερισμό, αρκετοί ερωτηθέντες δεν είναι διατεθειμένοι να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους ως προς το φυσικό αερισμό, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στην καθημερινότητα των μεσογειακών λαών. Για την αντιμετώπιση αυτής της στάσης και για την αύξηση της κοινωνικής αποδοχής του συστήματος, θα πρέπει να ενισχυθεί η ενημέρωση σχετικά με τα οφέλη του μηχανικού αερισμού αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

Οι εκπρόσωποι του τεχνικού κόσμου που συμμετείχαν στην έρευνα είχαν εμπειρία σε ενεργειακές αναβαθμίσεις κτιρίων, αλλά όχι σε εφαρμογές δικέλυφων όψεων. Ωστόσο, οι περισσότεροι θα ήθελαν να συμπεριλάβουν τέτοια συστήματα στα μελλοντικά έργα τους, αφού όμως πρώτα είχαν ενημερωθεί για τον τρόπο λειτουργίας και κατασκευής τους. Γι' αυτούς, το κυριότερο πλεονέκτημα του συστήματος είναι η αποδοτικότητα της θερμομονωτικής προστασίας και η ενεργειακή του απόδοση, ενώ ως αποτρεπτικοί παράγοντες εμφανίζονται το ενδεχόμενο υψηλό κόστος και η απροθυμία των πελατών τους να επενδύσουν σε αυτό.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι εμφανές ότι για να υποστηριχθεί η διάδοση μιας νέας τεχνολογίας είναι απαραίτητη η ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής της, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διαρκή πληροφόρηση και καμπάνιες ενημέρωσης των δυνητικών χρηστών της. Οικονομικά κίνητρα μπορούν να συνεισφέρουν θετικά ως προς την διείσδυση της τεχνολογίας στην αγορά, καθώς το αυξημένο κόστος συχνά επιφέρει διαταγμό.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας στάθηκαν καθοριστικά κατά την πρώτη φάση ανάπτυξης του συστήματος E2VENT, και μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες αντίστοιχες τεχνολογίες ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων. Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστεί ότι οι ληφθείσες απαντήσεις μπορεί να έχουν επηρεαστεί από τις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την περίοδο της έρευνας και ενδεχομένως να χρειαστεί επικαιροποίησή τους στο μέλλον. Μάλιστα, το μέγεθος της επιρροής των συνθηκών οικονομικής και κοινωνικής κρίσης που βιώνουν οι χώρες της νότιας Ευρώπης αποτελεί ένα ενδιαφέρον πεδίο έρευνας που θα μπορούσε να εξεταστεί σε μια επόμενη μελέτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή συντάχθηκε στο πλαίσιο του έργου E2VENT, το οποίο λαμβάνει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα Ορίζοντα 2020 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (grant agreement No 637261).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017, «Έκθεση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο «Αξιολόγηση του 2016 σχετικά με την πρόοδο που σημείωσαν τα κράτη μέλη το 2014 προς την επίτευξη των εθνικών στόχων ενεργειακής απόδοσης για το 2020 και την εφαρμογή της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση», Βρυξέλλες.
- [2] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010, "Roadmap 2050. A practical guide to a prosperous, low carbon Europe. Technical Analysis", Βρυξέλλες.

- [3] Ribeiro, F., Ferreira, P., Araújo, M., and Braga, A. C., 2014, "Public opinion on renewable energy technologies in Portugal", *Energy*, 69, pp. 39-50.
- [4] Moola, M. M. E., Maula, J., Hamdy, M., Fang, T., Jung, N., and Lahdelma, R., 2013, "Researching social acceptability of renewable energy technologies in Finland", *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), pp. 89-98.
- [5] Yuan, X., Zuo, J., and Ma, C., 2011, "Social acceptance of solar energy technologies in China—End users' perspective", *Energy policy*, 39(3), pp. 1031-1036.
- [6] Zoellner, J., Schweizer-Ries, P., and Wemheuer, C., 2008, "Public acceptance of renewable energies: Results from case studies in Germany", *Energy policy*, 36(11), pp. 4136-4141.
- [7] IEE Project TABULA, 2012, "Typology Approach for Building Stock Energy Assessment", <http://episcopes.eu/iee-project/tabula>
- [8] Assefa, G., and Frostell, B., 2007, "Social sustainability and social acceptance in technology assessment: A case study of energy technologies", *Technology in Society*, 29(1), pp. 63-78.
- [9] Kyung-Hee, K., 2007, "Overview on Public benefit campaigns to promote energy conservation and energy efficiency" In *The United Nations Forum on Energy Efficiency and Energy Security: Taking Collaborative Action on Mitigation Climate Change*.
- [10] van der Horst, D., 2007, "NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies", *Energy Policy* 35 (5), pp. 2705–2714.
- [11] Rogers, J. C., Simmons, E. A., Convery, I., and Weatherall, A., 2008, "Public perceptions of opportunities for community-based renewable energy projects", *Energy Policy*, 36(11), pp. 4217-4226.
- [12] Gerardts, M., 2014, "The ROCKPANEL business". Retrieved Roermond, the Netherlands - 25 November 2014, http://www.rockwool.com/files/COM2011/Investor/Presentations/2014/20141125_CMD_3_ROCKPANEL_MD-Mark-Gerardts.pdf

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΡΙΖΙΚΗ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Άρης Α. Μανωλίτσης, Ιωάννης Α. Ατσόνιος, Γεώργιος Κ. Σεμιτέλος, Ιωάννης Δ. Μανδηλαράς, Δήμος Α.Κοντογεώργος, Μαρία Α. Φούντη

¹ Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων Καύσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
e-mail: armnlts@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται ενεργειακή και τεchnοοικονομική ανάλυση για ριζική ανακαίνιση υφιστάμενου κτηρίου κατοικιών. Πρόκειται για μια πολυκατοικία πέντε ορόφων, 20 διαμερισμάτων συνολικά, 75m² το καθένα, κατασκευασμένη στην Αθήνα πριν από το 1980.

Εξετάζονται δύο σενάρια ως προς την ενεργειακή αναβάθμιση του κτηρίου. Το πρώτο αφορά την «Τυπική» ανακαίνιση, ενώ το δεύτερο την «Ριζική» του ανακαίνιση. Το σενάριο της «Τυπικής» ανακαίνισης, βασίστηκε στο πρόγραμμα TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) το οποίο και υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «Ευφυής Ενέργεια για την Ευρώπη».

Στην υπάρχουσα κατάσταση του, το κτήριο έχει κατασκευαστεί δίχως να έχει τοποθετηθεί θερμομόνωση στο κέλυφος του. Κατά την «Τυπική» ανακαίνιση, τοποθετείται θερμοπρόσοψη στο κτήριο, ενώ συγχρόνως μονώνεται η ταράτσα και το δάπεδο του, πάνω από τον ανοιχτό υπόστυλο χώρο (πιλοτή). Όσον αφορά τα ενεργειακά συστήματα του κτηρίου, ο λέβητας πετρελαίου αντικαθίσταται από λέβητα αερίου συμπύκνωσης, ενώ προκειμένου να υπάρξει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, πραγματοποιείται η εγκατάσταση Συστήματος Μηχανικού Αερισμού με πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας αέρα-αέρα για ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, σε κάθε διαμέρισμα ξεχωριστά. Η παραγωγή του ζεστού νερού χρήσης επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με λέβητες αερίου συμπύκνωσης που εγκαθίστανται επίσης σε κάθε διαμέρισμα, και ηλιακών συστημάτων που τοποθετούνται στην ταράτσα του κτηρίου. Για το σενάριο της «Ριζικής» ανακαίνισης του κτηρίου, το κτηριακό κέλυφος αντικαθίστανται με προκατασκευασμένες τοιχοποιίες ξηράς δόμησης, στις οποίες, για επιπλέον μόνωση έχουν τοποθετηθεί και Μονωτικές Σανίδες Κενού (VIPs) . Τα ενεργειακά συστήματα του κτηρίου, αναβαθμίζονται κατά παρόμοιο τρόπο με το σενάριο της «Τυπικής» ανακαίνισης του κτηρίου. Ταυτοχρόνως ο έλεγχος και η διαχείριση όλων των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου, επιτυγχάνεται με Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτηρίου (BEMs). Τέλος, για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του κτηρίου, έχει εγκατασταθεί συστοιχία φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η ενεργειακή ανάλυση και για τις δυο περιπτώσεις, πραγματοποιείται με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος EenergyPlus. Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης βασίζεται στην μέθοδο του Χρόνου Ανάκτησης Κεφαλαίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι γίνεται εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας κατά 77% στην περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης 92% στην περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης, σε σχέση με τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου πριν την ανακαίνιση του. Παράλληλα, η οικονομική αξιολόγηση έδειξε ότι ο χρόνος απόσβεσης και των δύο περιπτώσεων είναι περίπου 10,5 χρόνια, αλλά στην περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης υπάρχουν συνεχόμενα έσοδα εξαιτίας της πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή Αναβάθμιση, Τεchnο-οικονομική μελέτη, Ενεργειακή απόδοση κτηρίου, Κτήριο Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης (nZEB), Προκατασκευασμένα Συστήματα ξηράς δόμησης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κτηριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 39% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρώπης και για το 34% της Ελλάδας, ενώ παράλληλα είναι υπεύθυνος για το 36% των συνολικών εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Στην κατεύθυνση αυτή, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει οδηγίες, θέτοντας ένα πλαίσιο μέτρων στις χώρες που συμμετέχουν σε αυτή, για την προώθηση της ενεργειακής εξοικονόμησης, έτσι ώστε μέχρι το 2020 η κατανάλωση ενέργειας να μην υπερβαίνει τους 1.474 ισοδύναμους τόνους πετρελαίου πρωτογενούς ενέργειας ή τους 1.078 εκατομμύρια ισοδύναμους τόνους πετρελαίου τελικής ενέργειας. (Οδηγία «2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 22 Νοεμβρίου 2012 για την ενεργειακή απόδοση»).

Τα νέα κτήρια, θα πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται, βασιζόμενα στις οδηγίες αυτές που θέτουν περιορισμούς όσον αφορά την ενεργειακή τους κατανάλωση. Ταυτόχρονα, στην ίδια κατεύθυνση, στα ήδη υπάρχοντα κτήρια, που αποτελούν και την πλειοψηφία του οικιακού και του τριτογενή τομέα, πρέπει να γίνουν τέτοιες παρεμβάσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας [1]. Η ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της θερμομόνωσης του κελύφους τους, με σκοπό να υπάρχει η βέλτιστη παθητική θέρμανση και ψύξη σε αυτά. Επιπλέον ενέργεια μπορεί να εξοικονομηθεί και από την τοποθέτηση βελτιωμένων υαλοπινάκων με χαμηλούς συντελεστές θερμοπερατότητας αλλά και με άλλες πιο απλές και ταυτοχρόνως οικονομικές παρεμβάσεις, όπως για παράδειγμα η χρήση υλικών με καλές ανακλαστικές ιδιότητες στην τοιχοποιία και την οροφή του κτηρίου. Ταυτοχρόνως, η αναβάθμιση των ενεργειακών συστημάτων, για θέρμανση - κλιματισμό και για Ζεστό Νερό Χρήσης (ΖΝΧ), οδηγεί σε επιπλέον μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων [2].

Πολλές μελέτες και έρευνες εστιάζουν στο κατά πόσο οι παρεμβάσεις στο κέλυφος αλλά και η αναβάθμιση των ενεργειακών συστημάτων ενός κτηρίου, συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Οι τεχνοοικονομικές αυτές μελέτες, έχουν αποδείξει πως ο χρόνος απόσβεσης για την μετατροπή ενός τυπικού κτηρίου, ώστε αυτό να χαρακτηριστεί πλέον ως κτήριο σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB), κυμαίνεται περίπου στα 8 χρόνια. Η πιο αποδοτική παρέμβαση που μπορεί να γίνει στα κτήρια αυτά, είναι η θερμομόνωση του κελύφους του και η αντικατάσταση των υαλοπινάκων τους. Συμπληρωματικά, μπορούν να τοποθετηθούν παθητικά και ενεργειακά ηλιακά συστήματα ώστε να μειωθεί ο χρόνος απόσβεσης περίπου κατά ένα έτος [3].

Στην κατεύθυνση αυτή της εξοικονόμησης ενέργειας, προωθούνται τα τελευταία χρόνια και οι κατασκευές προκατασκευασμένων κτηρίων ξηράς δόμησης με ελαφρύ μεταλλικό σκελετό. Τα κτήρια αυτά, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα τυπικά κτήρια με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το βασικό πλεονέκτημα των κτηρίων αυτών, είναι η γρήγορη κατασκευή τους σε σχέση με τα τυπικά κτήρια σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους. Ταυτοχρόνως, έχουν πολύ καλές υδροθερμικές αντοχές, αποτελούνται από ανακυκλώσιμα υλικά, προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς, ενώ έχουν πολύ καλή αντσεισμική συμπεριφορά καθώς δέχονται μικρότερα φορτία σε περίπτωση σεισμού σε σχέση με τα συμβατικά κτήρια. Επίσης, τα προκατασκευασμένα μέρη ενός κτηρίου μπορούν να αφαιρεθούν από την ήδη υπάρχουσα κατασκευή, να επισκευασθούν ή να βελτιωθούν και να επανατοποθετηθούν με σχετική ευκολία στη περίπτωση που υπάρξει κάποια ανάγκη εξαιτίας οποιουδήποτε προβλήματος ή αστοχίας. Επιπλέον, όταν οι θερμομονωτικές τους κυρίως ιδιότητες χάσουν την αποδοτικότητα τους, μπορούν να αφαιρεθούν, να ανακατασκευαστούν με υλικά νέας τεχνολογίας [4,5].

Στη συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιείται ενεργειακή και τεχνοοικονομική μελέτη σε ριζική ανακαίνιση υφιστάμενου κτηρίου κατοικιών στην περιοχή της Αθήνας. Η ριζική ανακαίνιση, περιλαμβάνει την ολική ανακατασκευή του κελύφους του κτηρίου και την αντικατάσταση των ενεργειακών συστημάτων με αποδοτικότερα. Εξετάζονται δύο σενάρια, και συγκρίνονται τόσο σε σχέση με την υπάρχουσα κατασκευή όσο και μεταξύ τους. Το πρώτο σενάριο αφορά μια «Τυπική» ανακαίνιση, κατά την οποία τοποθετείται μόνωση στο κέλυφος και αναβαθμίζονται ενεργειακά συστήματα του κτηρίου. Κατά το δεύτερο σενάριο, εξετάζεται η «Ριζική» ανακαίνιση του κτηρίου, αντικαθιστώντας ολόκληρο το κέλυφος με προκατασκευασμένα συστήματα ξηράς δόμησης και ταυτόχρονα αναβαθμίζονται τα ενεργειακά συστήματα του κτηρίου. Η ενεργειακή προσομοίωση, υλοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus, το οποίο και προσφέρει μια πολύ καλή προσεγγιστική εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου. Η οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων ανακαίνισης, βασίζεται στη μέθοδο του Χρόνου Ανάκτησης Κεφαλαίου, προσδιορίζοντας τον Χρόνο Απόσβεσης (ΧΑ), ο οποίος και αποτελεί μια πρώτη εκτίμηση για το κατά πόσο είναι αποδοτική η κάθε επένδυση ξεχωριστά.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ

Το υπό μελέτη κτήριο είναι ένα πενταόροφο κτήριο κατοικιών, κατασκευασμένο στην περιοχή της Αθήνας, πριν από του 1980, χωρίς να τηρείται κανένας κανονισμός θερμομόνωσης. Διαθέτει 20 διαμερίσματα 75m² το καθένα με την συνολική επιφάνεια των δαπέδων του να είναι 1644m², την επιφάνεια της ταράτσας 355m² ενώ η εξωτερική τοιχοποιία του καταλαμβάνει επιφάνεια 1619m². Η επιφάνεια των ανοιγμάτων του κτηρίου στην ανατολική και δυτική του όψη είναι από 128m², στην νότια 38m², ενώ η βόρεια δε διαθέτει ανοίγματα. Κάθε διαμέρισμα του κτηρίου είναι χωρισμένο σε δύο θερμικές ζώνες. Η πρώτη θερμική ζώνη αφορά το σαλόνι και την κουζίνα, ενώ η δεύτερη τα υπνοδωμάτια του κάθε διαμερίσματος. Οι βαθμομέρες θέρμανσης έχουν υπολογιστεί στους 1077Kdays θερμώντας σαν θερμοκρασία βάσης τους 20°C. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το κτήριο ενώ στον Πίνακα 1 τα βασικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 1: Το υπό εξέταση κτήριο.

Πίνακας 1. Γενικά Χαρακτηριστικά του Κτηρίου

Περιγραφή	Τιμές
Τύπος	Πολυκατοικία 5 ορόφων
Τοποθεσία	Αθήνα
Επιφάνεια δαπέδων	1644 m ²
Επιφάνεια οροφής	355 m ²
Επιφάνεια τοιχοποιίας	1619 m ²
Επιφάνεια παραθύρων	294 m ²
Βαθμομέρες θέρμανσης	1077 Kdays

2.1. Περιγραφή του κελύφους του κτηρίου.

Ο φέρον οργανισμός του κτηρίου είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τον Γενικό Οικοδομικό Κανονισμό (Γ.Ο.Κ.) του 1973. Τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού είναι επιχρισμένα και από τις δύο όψεις με τον συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value) να είναι ίσος με 3.40 W/m²K. Κατά την υπάρχουσα κατασκευή του κτηρίου, η τοιχοποιία του είναι τύπου μπιατικής οπτοπλινθοδομής, επιχρισμένη και από τις δύο όψεις, με το U-value να είναι ίσο με 2.20W/m²K. Το σενάριο της «Τυπικής» ανακαίνισης, βασίστηκε στο πρόγραμμα TABULA και που σαν στόχο είχε την δημιουργία ενός ηλεκτρονικού εργαλείου που θα περιελάμβανε τις τυπολογίες των κτηρίων ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος και την ηλικία του κτηρίου, την τυπολογία κατασκευής, των Η/Μ εγκαταστάσεων, σε συνδυασμό με την ενεργειακή αποδοτικότητα του κτηρίου και το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Κατά την «Τυπική» ανακαίνιση, τοποθετείται διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), πάχους 8εκ εξωτερικά στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού αλλά και στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, 9εκ. στην οροφή του και 6εκ. κάτω από το δάπεδο του κτηρίου με το U-value να είναι αντίστοιχα 0.44 W/m²K, 0.41 W/m²K, 0.39 W/m²K και 0.50 W/m²K. Τα κουφώματα του κτηρίου αντικαθίστανται με συνθετικά, τριπλών υαλοπινάκων νέας γενιάς, με αέριο Αργό ανάμεσα στα κενά των υαλώσεων.

Στη περίπτωση της «ΡΙζικής» ανακαίνισης, η υπάρχουσα τοιχοποιία του κτηρίου αντικαθιστάται πλήρως από προκατασκευασμένη τοιχοποιία ξηράς δόμησης με ελαφρύ μεταλλικό σκελετό. Η συναρμογή της, πραγματοποιείται πάνω στον φέροντα οργανισμό του, με χρήση ειδικών συνδέσμων. Για επιπλέον θερμομόνωση, τοποθετούνται μονωτικές σανίδες κενού (Vacuum Insulation Panels-VIPs) οι οποίες και κατατάσσονται στη κατηγορία των υπέρ-μονωτικών υλικών. Το U-value της τοιχοποιίας αυτής είναι 0.25W/m²K, συνυπολογίζοντας τις σημειακές και γραμμικές θερμογέφυρες. Το U-value της οροφής του κτηρίου έχει υπολογιστεί στα 0.31W/m²K, ενώ του δαπέδου είναι ίσο με 0.51W/m²K. Τα κουφώματα του κτηρίου είναι ίδιου τύπου, όπως και στην περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κελύφους του κτηρίου.










2.2. Περιγραφή Ενεργειακών Συστημάτων του κτηρίου.

Στην υπάρχουσα κατάσταση του κτηρίου, χρησιμοποιείται για θέρμανση λέβητας πετρελαίου, παλαιάς τεχνολογίας, με το κεντρικό δίκτυο διανομής να βρίσκεται κυρίως σε μη θερμαινόμενους χώρους με σωληνώσεις του δικτύου να είναι δίχως θερμομόνωση. Ο βαθμός απόδοσης του καυστήρα πετρελαίου θεωρείται ίσος με 80%, με τις απώλειες στις σωληνώσεις να υπολογίζονται περίπου στο 10%. Για παραγωγή ΖΝΧ, κάθε διαμέρισμα θεωρήθηκε ότι διαθέτει το δικό του σύστημα, με ατομικούς λέβητες πετρελαίου, χωρητικότητας 190lt, ονομαστικής απόδοσης 75% και 15% απώλειες λόγω ελλιπούς μόνωσης στο δίκτυο.

Στην περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης, ο λέβητας πετρελαίου αντικαθίσταται από λέβητα αερίου συμπίκνωσης, ο οποίος έχει ονομαστική απόδοση 105% ενώ οι απώλειες των σωληνώσεων του κυκλώματος θέρμανσης μειώνονται στο 5% με την τοποθέτηση μόνωσης. Ταυτόχρονα σε κάθε διαμέρισμα, εγκαθίστανται και σύστημα μηχανικού αερισμού με ανάκτηση θερμότητας του απορριπτόμενου αέρα, απόδοσης 80%. Η παραγωγή ZNX σε κάθε διαμέρισμα πραγματοποιείται με το συνδυασμό ενός λέβητα φυσικού αερίου συμπίκνωσης απόδοσης 110% και ηλιακού θερμοσίφωνα επιφάνειας 3.5m². Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες τοποθετούνται με τον κατάλληλο προσανατολισμό και γωνία στην οροφή του κτηρίου. Οι σωληνώσεις του δικτύου ZNX μονώνονται με τις απώλειες να προσδιορίζονται στο 10%.

Στην περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης, το σύστημα θέρμανσης και μηχανικού αερισμού, θεωρήθηκε ίδιο όπως και στην περίπτωση της «Τυπική» ανακαίνισης. Για επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, τοποθετούνται Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (BEMs) τα οποία εποπτεύουν και ελέγχουν τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα του κτηρίου. Παράλληλα, οι θερμοστάτες του συστήματος θέρμανσης, έχουν ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όποτε στα διαμερίσματα υπάρχουν οι ένοικοι τους, η θερμοκρασία τους να είναι στους 20°C ενώ για τις υπόλοιπες ώρες στους 18°C. Επιπλέον κατά τις βραδινές ώρες, η θερμοκρασία των θερμοστατών είναι στους 20°C στα υπνοδωμάτια και στους 18°C στους υπόλοιπους χώρους του διαμερίσματος. Η παραγωγή ZNX πραγματοποιείται με συνδυασμό των ηλιακών συστημάτων και λεβήτων συμπίκνωσης αερίου απόδοσης 110%, με τις σωληνώσεις του δικτύου να είναι μονωμένες. Τα ηλιακά πάνελ κάθε διαμερίσματος καταλαμβάνουν επιφάνεια 4m² το καθένα και είναι τοποθετημένα με κατάλληλο προσανατολισμό και κλίση. Τέλος, τοποθετούνται φωτοβολταϊκά συστήματα ονομαστικής απόδοσης 18% τα οποία και παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα συστήματα θέρμανσης, μηχανικού αερισμού και ZNX. ενώ η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια πωλείται στον ηλεκτρικό πάροχο. Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου.


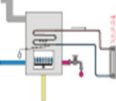

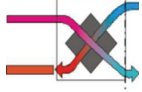

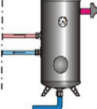
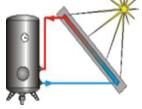
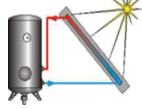
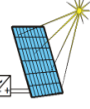
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά κελύφους κτηρίου

	Υπάρχουσα Κατασκευή	Τυπική Ανακαίνιση	Ριζική Ανακαίνιση	
Εξωτερική Τοιχοποιία	Επιφάνεια (m ²)	1325	1325	1325
	Σχήμα			
	Τύπος κατασκευής	-Μπατική οπτοπλινθοδομή, επιχρισμένη και από τις δυο πλευρές	- Μπατική οπτοπλινθοδομή -80 mm μόνωσης (EPS)	-Γυψοσανίδα -Πετροβάμβακας -Μονωτικές σανίδες κενού (VIP) -Πετροβάμβακας -Γυψοσανίδα -Αεριζόμενη πρόσοψη
	Πάχος (m) U-Value* [W/m ² .K]	0.2 2.2	0.28 0.41	0.318 0.25
Οροφή	Επιφάνεια (m ²)	355	355	355
	Σχήμα			
	Τύπος κατασκευής	Συμβατικού τύπου δώμα χωρίς θερμομονωτική προστασία	-Συμβατικού Τύπου δώμα -90mm μόνωσης (EPS)	-Γυψοσανίδα -Πετροβάμβακας -Γυψοσανίδα -Πετροβάμβακας -Πλάκα Δαπέδου
	Πάχος (m) U-Value* [W/m ² .K]	0.3 3.05	0.39 0.39	0.46 0.48
Δάπεδο	Επιφάνεια (m ²)	355	355	355
	Σχήμα			

Τύπος κατασκευής	- Δάπεδο με επικάλυψη παντός τύπου επάνω από ανοικτό υπόστυλο χώρο.	- Δάπεδο με επικάλυψη παντός τύπου επάνω από ανοικτό υπόστυλο χώρο. -60 mm μόνωσης (EPS)	- Δάπεδο - Πλάκες διαπέδου - Ηχομόνωση - Πλάκες Διαπέδου - Πετροβάμβακας - Γυψοσανίδα - Οπλισμένο σκυρόδεμα
Πάχος (m)	0.3	0.36	0.61
U-Value* [W/m ² .K]	3.1	0.5	0.51

* Οι τιμές των U-values περιλαμβάνουν όλες τις θερμογέφυρες.

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά Ενεργειακών Συστημάτων Κτηρίου

	Υπάρχουσα Κατασκευή	Τυπική Ανακαίνιση	Ριζική Ανακαίνιση
Σύστημα Κεντρικής Θέρμανσης	 <p>- Λέβητας πετρελαίου - Ονομαστική Απόδοση: 80% - Σωληνώσεις χωρίς θερμομόνωση, Απώλειες: 10%</p>	 <p>- Λέβητας αερίου συμπύκνωσης - Ονομαστική απόδοση: 105% - Μονωμένες σωληνώσεις, Απώλειες: 5%</p>	 <p>- Λέβητας αερίου συμπύκνωσης - Ονομαστική απόδοση: 105% - Μονωμένες σωληνώσεις, απώλειες: 5% - Συστήματα ενεργειακής Διαχείρισης κτηρίου (BEMs)</p>
Σύστημα Αερισμού	-	 <p>- Σύστημα Μηχανικού αερισμού για κάθε διαμέρισμα - Ανάκτηση θερμότητας: 80%</p>	 <p>- Σύστημα Μηχανικού αερισμού για κάθε διαμέρισμα - Ανάκτηση θερμότητας: 80%</p>
Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης	 <p>- Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης για κάθε διαμέρισμα - Λέβητας πετρελαίου, 190 lt - Ονομαστική απόδοση: 75% - Αμόνωτες σωληνώσεις, απώλειες: 15%</p>	 <p>- Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης για κάθε διαμέρισμα - Ηλιακά συστήματα (3.5m² ηλιακών συλλεκτών ανά διαμέρισμα) - Λέβητας αερίου συμπύκνωσης - Μονωμένες σωληνώσεις δικτύου ZNX, απώλειες: 10%</p>	 <p>- Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης για κάθε διαμέρισμα - Ηλιακά Συστήματα (4m² ηλιακών συλλεκτών ανά διαμέρισμα) - Λέβητας αερίου συμπύκνωσης (110% απόδοση, 200 lt) - Μονωμένες σωληνώσεις δικτύου ZNX, απώλειες: 10%</p>
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	-	-	 <p>- Φωτοβολταϊκά Συστήματα - Επιφάνεια: 95 m² - Ονομαστική Απόδοση: 18%</p>

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου, υπολογίστηκε η ετήσια ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση του, τον αερισμό του και την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή ΖΝΧ. Η ενεργειακή του προσομοίωση έγινε με το λογισμικό EnergyPlus. Το πρόγραμμα αυτό, βασίζεται στην ταυτόχρονη λειτουργία πολλών υποπρογραμμάτων τα οποία υπολογίζουν την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση κτηρίου, όπως και την κατανάλωση των ενεργειακών του συστημάτων, χρησιμοποιώντας μια πληθώρα πληροφοριών, οι οποίες και εισάγονται σε αυτό, ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση και η ενεργειακή ανάλυση. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στηριζόμενοι σε θεμελιώδεις αρχές της μεταφοράς θερμότητας. Σε λογισμικά ενεργειακής ανάλυσης, όπως το BLAST (Building Loads and Systems Thermodynamics) και το DOE-2 (Department of Energy-2), οι θερμικές ζώνες, τα συστήματα αερισμού, θέρμανσης, ψύξης, παραγωγής ΖΝΧ, προσομοιώνονται διαδοχικά χωρίς να υπάρχει κάποια ανάδραση μεταξύ τους. Την αδυναμία αυτή λύνει το πρόγραμμα EnergyPlus, το οποίο και εφαρμόζει μεθόδους προσομοίωσης με αλληλεπίδραση και εξάγει αποτελέσματα με χρονικά βήμα λιγότερο της μιας ώρας. Καθώς όμως το πρόγραμμα EnergyPlus εξετάζει τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας ως μονοδιάστατα, έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να εισαχθούν οι γραμμικές (2D) και οι σημειακές γεωμετρικές (3D) θερμογέφυρες στην ενεργειακή μελέτη του κτηρίου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται, έχει αναλυθεί σε παλαιότερες δημοσιεύσεις και βασίζεται στον υπολογισμό ισοδύναμων θερμικών ιδιοτήτων (θερμική αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα και πυκνότητα) ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των θερμογεφυρών [6].

Κάθε διαμέρισμα, χωρίζεται σε δύο θερμικές ζώνες, συνεπώς οι συνολικές θερμικές ζώνες ολόκληρου του κτηρίου να είναι 41 (συμπεριλαμβάνοντας και τη θερμική ζώνη του κλιμακοστασίου και των υπολοίπων κοινόχρηστων χώρων). Η μέση κατανάλωση ΖΝΧ για κάθε διαμέρισμα, θεωρήθηκε ίση με 126 lt/ημέρα (περίπου 2,5 κάτοικοι ανα διαμέρισμα) [7].

Η οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση της επένδυσης για τα δύο σενάρια ανακαίνισης του κτηρίου, βασίζεται στο μέθοδο του Χρόνου Ανάκτησης Κεφαλαίου. Ο Χρόνος Απώσβεσης (ΧΑ) αποτελεί μια πρώτη εκτίμηση υπολογισμού της αποδοτικότητας μιας επένδυσης. Για τον προσδιορισμό του, για κάθε μια περίπτωση ανακαίνισης ξεχωριστά χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$PP = \frac{C_0}{C_t} \quad (1)$$

Όπου C_0 είναι η Αρχική Δαπάνη (ΑΔ) και C_t το Ετήσιο Όφελος (ΕΟ) της κάθε επένδυσης.

Το Ετήσιο Όφελος (C_t) υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$C_t = OC_{EB} - OC_{RB} \quad (2)$$

Όπου OC_{EB} είναι το λειτουργικό κόστος για την υπάρχουσα κατασκευή, και OC_{RB} το λειτουργικό κόστος για κάθε περίπτωση ανακαίνισης του κτηρίου.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

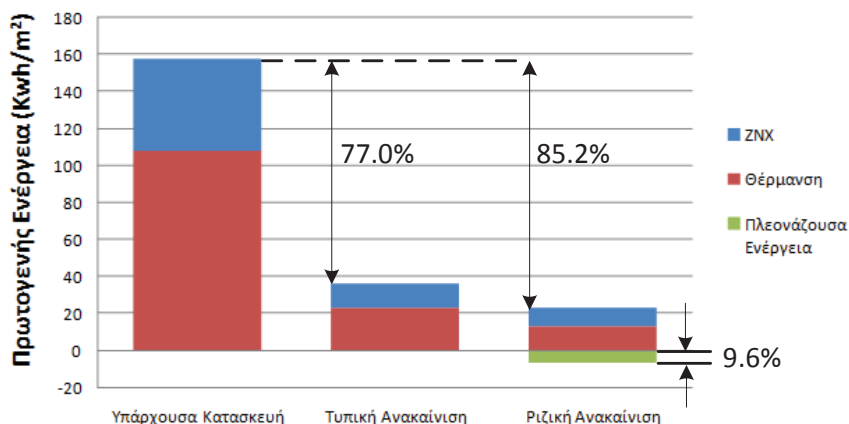
4.1. Ενεργειακή Ανάλυση

Τα βασικότερα αποτελέσματα που αφορούν την ενεργειακή ανάλυση του κτηρίου, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4. Ο συνολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας του υπάρχοντος κτηρίου είναι 6481 W/K, ενώ στην περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης 1623 W/K και στην περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης 905 W/K. Για την υπάρχουσα κατασκευή, η καθαρή πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου για θέρμανση και παραγωγή ΖΝΧ είναι ίση με 157.5 kWh/(m²·year). Κατά την «Τυπική» ανακαίνιση, η κατανάλωση αυτή μειώνεται στα 36.2 kWh/(m²·year), ενώ η «Ριζική» ανακαίνιση οδηγεί σε επιπλέον μείωση, με την κατανάλωση ενέργειας να υπολογίζεται στις 11.9 kWh/(m²·year), λαμβάνοντας υπόψη και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η μείωση αυτή ποσοστιαία μεταφράζεται κατά 77% για την περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης και κατά 92.0% για την περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης.

Πίνακας 4 Σύνοψη αποτελεσμάτων Ενεργειακής Προσομοίωσης

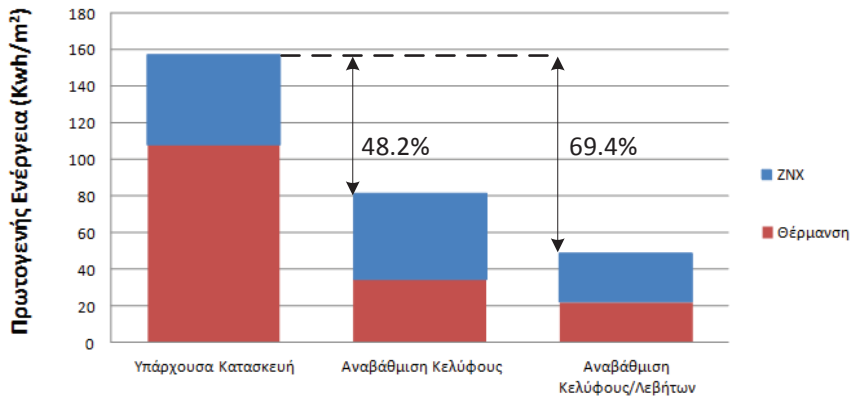
	Υπάρχουσα Κατασκευή	Τυπική Ανακαίνιση	Ριζική Ανακαίνιση
Συνολικός Συντελεστής Απωλειών Θερμότητας του κτηρίου [W/K]	6481	1623	905
Πρωτογενής Ενεργειακή Κατανάλωση για Θέρμανση [kWh/ m ² ·year]	108.1	22.6	11.9
Πρωτογενής Ενεργειακή Κατανάλωση για ΖΝΧ [kWh/m ² ·year]	49.4	13.5	10.0
Ετήσια πρωτογενής Ενεργειακή Παραγωγή [kWh/m ² ·year]	0	0	15.2
Συνολική πρωτογενής Ενεργειακή Κατανάλωση του κτηρίου [kWh/m ² ·year]	157.5	36.2	6.7

Η συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας για τα δύο σενάρια ανακαίνισης, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ΖΝΧ είναι 77% για την «Τυπική» ανακαίνιση και 86.1% για την «Ριζική» ανακαίνιση. Πιο συγκεκριμένα, στην «Τυπική» ανακαίνιση για τη θέρμανση του κτηρίου απαιτούνται 22.6 kWh/(m²·year), και 13.5 kWh/(m²·year) για την παραγωγή ΖΝΧ, ενώ για το σενάριο της «Ριζικής» ανακαίνισης η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση είναι 11.9 kWh/(m²·year) και 10.0 kWh/(m²·year) για παραγωγή ΖΝΧ. Η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση για την «Τυπική» ανακαίνιση, μεταφράζεται σε μια μείωση κατά, 79.6%, δηλαδή 73.7 kWh/(m²·year), ενώ στην «Ριζική» του ανακαίνιση κατά 88.1%. Αντίστοιχα, για την παραγωγή ΖΝΧ η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται κατά 72.6% κατά την «Τυπική» ανακαίνιση και κατά 78.8% κατά την «Ριζική» ανακαίνιση.



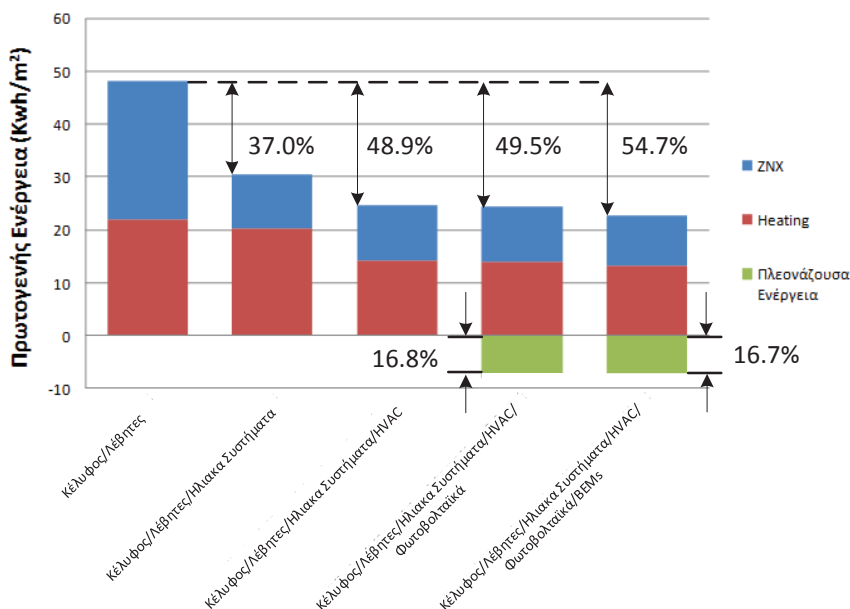
Εικόνα 2. Οι συνολικές Ενεργειακές Καταναλώσεις

Στην Εικόνα 3, παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις έπειτα από την ανακαίνιση του κελύφους και την αναβάθμιση των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου, για την περίπτωση της «Ριζικής ανακαίνισης». Η ανακαίνιση του κελύφους, οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης κατά 75.9 kWh/(m²·year) ενώ επιπλέον εξοικονόμηση κατά 33.4 kWh/(m²·year) επιτυγχάνεται ύστερα από την αντικατάσταση των παλαιών λεβήτων και σωληνώσεων για την θέρμανση των διαμερισμάτων και την παραγωγή ΖΝΧ.



Εικόνα 3. Μειώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση ύστερα από την ανακαίνιση του κελύφους και την αναβάθμιση των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου.

Τέλος, στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι επιμέρους ενεργειακές καταναλώσεις και οι μειώσεις που επιφέρει η τοποθέτηση ηλιακών συλλεκτών, το σύστημα μηχανικού αερισμού, η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων και η λειτουργία των BEMs. Σαν κατάσταση αναφοράς, ορίζεται η περίπτωση κατά την οποία έχει πραγματοποιηθεί ανακαίνιση του κελύφους του κτηρίου με τοποθέτηση προκατασκευασμένων τοιχοποιιών και αναβάθμιση των λεβήτων και σωληνώσεων για θέρμανση και παραγωγή ZNX. Αρχικά, η τοποθέτηση ηλιακών συλλεκτών οδηγεί σε μια επιμέρους εξοικονόμηση ενέργειας κατά 17.9 kWh/m^2 . Η εγκατάσταση του συστήματος μηχανικού αερισμού με ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, οδηγεί σε επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας κατά $5.7 \text{ kWh/(m}^2 \cdot \text{year)}$. Επιπλέον, η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει σαν αποτέλεσμα περαιτέρω μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτά, χρησιμοποιείται για την κάλυψη της λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, πωλείται στο δίκτυο και μεταφράζεται σε μια επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας κατά 16.8%. Τέλος με την λειτουργία των BEMs, ελέγχοντας τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα του κτηρίου, επιτυγχάνονται βέλτιστες, συνθήκες άνεσης στους ενοίκους της πολυκατοικίας, λειτουργίας για τις συσκευές και βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Τέλος, η επιπλέον μείωση στην κατανάλωση ενέργειας από τη λειτουργία των BEMs είναι 5.1%.



Εικόνα 4. Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας εξαιτίας της τοποθέτησης Ηλιακών Συστημάτων, Μηχανικού Αερισμού, Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και εγκατάστασης ΒΕΜs.

4.2. Οικονομική Ανάλυση

Το αρχικό κόστος για κάθε περίπτωση ανακαίνισης του κτηρίου, προκύπτει από το κόστος τόσο για την αναβάθμιση του κελύφους όσο και για τα ενεργειακά του συστήματα. Ο Πίνακας 5, συνοψίζει τις τιμές που λήφθηκαν υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους των δυο σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης του κτηρίου.

Πίνακας 5: Κόστη Αναβαθμίσεων

Ύπος Ανακαίνισης	Κόστος Αναβάθμισης Κελύφους (€)		Κόστος Αναβάθμισης Ενεργειακών Συστημάτων (€)			Ολικό Κόστος (€)
	Υλικά	Εργατικά	Θέρμανση	ΖΝΧ	Φωτοβολταϊκά	
Γυψική Ανακαίνιση	184776.00	43620.00	22400.00	20800.00	0.00	271596.00
Ριζική Ανακαίνιση	244926.00	35579.00	22400.00	20800.00	9600.00	333305.00

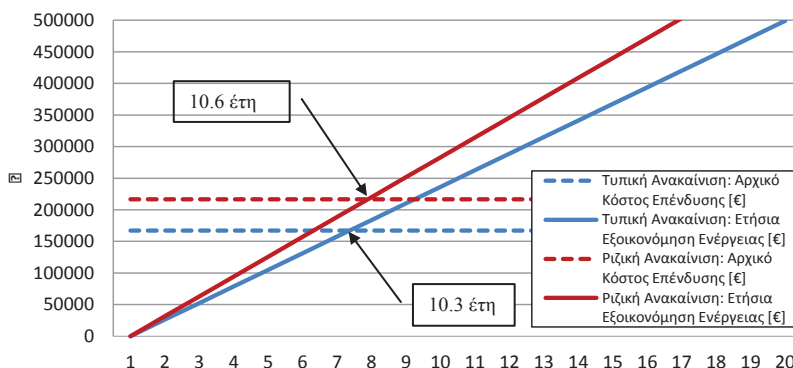
Η οικονομική ανάλυση για τις υπό μελέτη περιπτώσεις, λαμβάνει υπόψη τα ετήσια έξοδα από την κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων θέρμανσης και ΖΝΧ του κτηρίου. Στην περίπτωση της «Ριζικής» ανακαίνισης, οι ηλεκτρικές ανάγκες για τη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου καλύφθηκαν εξ ολοκλήρου από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την συστοιχία των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών. Στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται το ετήσιο κόστος των ενεργειακών αναγκών για την υπάρχουσα κατάσταση του κτηρίου αλλά και για τις περιπτώσεις των ανακαίνισεων ξεχωριστά. Κατά την «Τυπική» ανακαίνιση, προέκυψε μείωση στα λειτουργικά έξοδα για τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου κατά 26254.0 €/έτος (86.0% μείωση του κόστους των ενεργειακών αναγκών), ενώ για την περίπτωση της ριζικής ανακαίνισης του κτηρίου είναι 28997 €/έτος (94.5% μείωση του κόστους). Ταυτοχρόνως, εάν ληφθούν υπόψη και τα έσοδα από την πώληση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στον πάροχο του ηλεκτρικού ρεύματος, παρατηρείται θετική ταμειακή ροή κατά 879.6€/έτος.

Πίνακας 2 Ετήσιο Κόστος Ενεργειακής Κατανάλωσης, Ετήσια Έσοδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Συνολικά Ετήσια Λειτουργικά Κόστη.

	Υπάρχουσα Κατασκευή	Τυπική Ανακαίνιση	Ριζική Ανακαίνιση
Κόστος Ενεργειακής Κατανάλωσης [€]	30562.90	4308.70	1565.90
Έσοδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [€]	0.00	0.00	2445.50
Ετήσιο Λειτουργικό Κόστος [€]	30562.90	4308.70	-879.60

Ο χρόνος απόσβεσης των υπό εξέταση περιπτώσεων ανακαίνισης, προέκυψε ακολουθώντας τη μεθοδολογία του Χρόνου Ανάκτησης Κεφαλαίου. Συγκρίνοντας τη μείωση του λειτουργικού κόστους για τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου, σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση και λαμβάνοντας υπόψη τα έξοδα που απαιτούνται ύστερα από τις παρεμβάσεις στο κελύφος και τα ενεργειακά συστήματα του κτηρίου, προκύπτει ο χρόνος απόσβεσης (ΧΑ), για κάθε σενάριο ξεχωριστά

Για το σενάριο της «Τυπικής» ανακαίνισης, ο ΧΑ είναι ίσος με 10.3 έτη ενώ για το σενάριο της «Ριζικής» ανακαίνισης ο ΧΑ υπολογίστηκε στα έτη.10.6. Επίσης, για την «Ριζική» ανακαίνιση, από τη στιγμή που αποσβένεται το αρχικό κεφάλαιο και μέχρι τα 20 έτη, λόγω της πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα στο δίκτυο, η ταμειακή ροή υπολογίζεται περίπου στα 120000€. Στο διάγραμμα της Εικόνας 6 που ακολουθεί, φαίνονται σχηματικά τα νεκρά σημεία για κάθε μια επένδυση ξεχωριστά.



Εικόνα 5. Αρχικά κόστη επενδύσεων, ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και Χρόνοι απόσβεσης.

Λαμβάνοντας υπόψη πως η μέση επιδότηση για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση κυμαίνεται περίπου στο 35% του συνολικού κόστους του έργου, ο χρόνος απόσβεσης και για τις δύο υπό μελέτη περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο και να φτάσει στα 6.4 έτη για την περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης και στα 6.9 έτη για την περίπτωση της «Ριζικής Ανακαίνισης».

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, αναλύθηκαν τεχνοοικονομικά δυο σενάρια ανακαίνισης ενός υφιστάμενου πενταόροφου κτηρίου κατοικιών για την περιοχή της Αθήνας. Η μια περίπτωση αφορούσε την «Τυπική ανακαίνιση του και η άλλη την «Ριζική» ανακαίνιση του κελύφους και των ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου. Η «Τυπική» ανακαίνιση, περιελάμβανε την μόνωση του κελύφους του κτηρίου και την αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης και παραγωγής Ζεστού Νερού Χρήσης. Κατά την «Ριζική» ανακαίνιση, οι τοιχοποιίες του κτηρίου αντικαταστάθηκαν εξ ολοκλήρου από προκατασκευασμένες τοιχοποιίες ξηράς δόμησης με ελαφρύ μεταλλικό σκελετό. Τα ενεργειακά συστήματα αναβαθμίστηκαν πλήρως, όπως στην περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης ενώ επιπλέον, εγκαταστάθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ στην οροφή του κτηρίου για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών.

Συγχρόνως τοποθετήθηκαν και Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτηρίου (BEMs), ως προς την ορθολογική λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων.

Από την ενεργειακή προσομοίωση του κτηρίου με το πρόγραμμα EnergyPlus, προέκυψε πως η πρωτογενής ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου για την «Τυπική» ανακαίνιση ήταν μειωμένη κατά 77% σε σχέση με την υπάρχουσα κατασκευή. Οι τροποποιήσεις στο κέλυφος του, με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων τοιχοποιιών ξηράς δόμησης μονωμένων με VIPs, καθώς και η χρήση BEMs οδήγησαν σε μια επιπλέον μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου κατά 5.7%, συνολικά κατά 82.7% σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση του κτηρίου. Συγχρόνως και με την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του κτηρίου από φωτοβολταϊκά συστήματα, η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται στο 92.4% της αρχικής κατανάλωσης ενέργειας. Στη δημοσίευση αυτή, θεωρούμε ότι το τυπικό κτήριο που εξετάζουμε και είναι το κτήριο αναφοράς, δεν διαθέτει σύστημα ψύξης πριν την ανακαίνιση κάτι που αντιπροσωπεύει μεγάλη μερίδα των κτηρίων κατοικιών της ζώνης Β, τα οποία διαθέτουν κάποιες φορές μεμονωμένες κλιματιστικές μονάδες για να καλύψουν ένα μικρό ποσοστό του συνολικού όγκου της εκάστοτε κατοικίας

Η οικονομική ανάλυση που ακολούθησε έδειξε πως η περίοδος ανάκτησης του κεφαλαίου τόσο για το για το σενάριο της «Τυπικής» όσο και της «Ριζικής» ανακαίνισης είναι σχεδόν η ίδια. Πιο συγκεκριμένα, ο ΧΑ, είναι κατά 2.5 μήνες πιο σύντομος για την περίπτωση της «Τυπικής» ανακαίνισης του κτηρίου. Κατά την «Ριζική» ανακαίνιση όμως, μετά το πέρας των 10.6 ετών, υπάρχουν συνεχόμενα έσοδα από την πώληση στο δίκτυο της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες με συστήματα ξηράς δόμησης έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τυπικές τοιχοποιίες (ανακυκλώσιμα υλικά, αφαίρεση και αντικατάσταση, υγροθερμική αντοχή, σεισμική συμπεριφορά, αντοχή σε περίπτωση πυρκαγιάς κ.α.).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Corrado V., Ballarini I., Paduos S., Primo E., Refurbishment of the residential building stock toward the nearly-zero energy target through the application of the building typology, 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2016, 14-16 September 2016, Turin, Italy.
- [2] Huang Yu, Niu Jian lei, A review of the advance of HVAC technologies as witnessed in ENB publications in the period from 1987 to 2014, Energy and Buildings, 130 (2016) 33-45.
- [3] Serghides D.K., Dimitriou S., Katafygiotou M.C., Michaelidou M., Energy efficient refurbishment towards nearly zero energy houses, for the Mediterranean region, 7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, Energy Procedia 83 (2015) 533 – 543
- [4] Lawson RM, Ogden RG, Bergin R. Application of modular construction in high-rise buildings. Journal of Architectural Engineering 18(2):148–154, 2012
- [5] Haas CT, Fagerlund WR. Preliminary research on prefabrication, pre-assembly, modularization and off-site fabrication in construction. Report, Austin, Texas: The Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin; 2002.
- [6] I.A Atsonios, A.A. Manolitsis, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti., The Effect of Vacuum Insulation Panels on the Energy Efficiency of Lightweight Steel-framed Drywall Buildings, International Conference "Energy in Buildings 2016", 12 November 2016, Athens, Greece
- [7] <http://www.energynius.gr/files4users/files/TOTEE-parametroi%20EN-Diefkiniseis-21-02-11i.pdf>.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Θ.Ι. Μπακάλης¹, Α.Α. Μπαξεβάνου^{1*}, Δ.Κ. Φειδαρος², Α. Τσαγκρασούλης²

^{1*} Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ Θεσσαλίας, 41110 Λάρισα,

² Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΘ, 38333 Βόλος
e-mail: cbaxev@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται απόπειρα αξιολόγησης δυο λογισμικών εκτίμησης της ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων συγκρίνοντας τα θερμικά και ψυκτικά φορτία για διάφορα πάχη μονωτικού υλικού και ελέγχοντας τα χρονικά βήματα ολοκλήρωσης στην διάρκεια ενός έτους στο ένα από αυτά. Τα λογισμικά που αξιολογούνται είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούμενα σε διαφορετικές κατηγορίες χρηστών. Το πρώτο από αυτά εξυπηρετεί την αναγκαιότητα των ενεργειακών επιθεωρήσεων ως βασικό υπολογιστικό εργαλείο (TEE-KENAK) για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων για λόγους κατάταξης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτηρίων στην Ελλάδα. Ενώ το δεύτερο λογισμικό δρα ως ερευνητικό εργαλείο (EnergyPlus) για την προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων, καθώς παρέχει μεγαλύτερη ευχέρεια ορισμού παραμέτρων που άπτονται της γενικής και ειδικής ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κελύφους που εξυπηρετείται από Η/Μ διατάξεις για την ικανοποίηση των εσωτερικών συνθηκών άνεσης. Η παρουσία χρηστών λαμβάνεται υπόψη και στα δύο μοντέλα – υπολογιστικά εργαλεία που εκτός από τις Η/Μ διατάξεις ορίζουν την λειτουργία και άλλων συσκευών. Τα δύο λογισμικά οφείλουν την ύπαρξη τους σε δύο διαφορετικές φιλοσοφίες αριθμητικών μοντέλων υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην στατική θεώρηση με το μοντέλο ημι-σταθερής κατάστασης μηνιαίου βήματος όπως αυτό προτείνεται ως μια ενδεχόμενη επιλογή εφαρμογής από το πρότυπο ENISOEΛOT 13790:2009, ενώ η δεύτερη κατηγορία αποτελεί την λεγόμενη δυναμική επιλογή για ενεργειακή ανάλυση και προσομοίωση των θερμικών και ψυκτικών αναγκών ενός κτηρίου έτσι όπως υλοποιείται μέσα από το λογισμικό EnergyPlus.

Στην αξιολόγηση αυτή αρχικά διερευνάται η συμπεριφορά ενός μικρού κτηρίου κατοικίας στην Θεσσαλονίκη, υπολογίζεται η ετήσια ενεργειακή απόδοση για διάφορα πάχη μονωτικού υλικού και με τα δύο εργαλεία και ελέγχονται τα αποτελέσματα τους συγκριτικά μεταξύ τους. Εξετάζονται διεξοδικά τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία για ίδιο κτήριο και πρόγραμμα λειτουργίας του και αναλύονται οι διαφορές που προκύπτουν από τα δύο μοντέλα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το στατικό μοντέλο δίνει μικρότερες προβλέψεις από το δυναμικό και για τα δύο είδη φορτίων με διαφορετική συμπεριφορά για το καθένα. Οι απόλυτες διαφορές είναι σημαντικότερες για τα ψυκτικά φορτία από ότι για τα θερμικά. Σε δεύτερη φάση ελέγχονται τα αποτελέσματα των χρονικά μεταβαλλόμενων προσομοιώσεων που προκύπτουν με διαφορετικά χρονικά βήματα και προκύπτουν συμπεράσματα που σχετίζονται με την δαπάνη υπολογιστικού χρόνου και ισχύος στην σημαντικότητα των αποτελεσμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: Θερμικά Φορτία, Ψυκτικά Φορτία, Πάχος μόνωσης, TEE-KENAK, EnergyPlus, Στατικές & Δυναμικές προσομοιώσεις ενεργειακής συμπεριφοράς

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα κτήρια είναι ο μεγάλος καταναλωτής ενέργειας τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Παράλληλα, ενώ η αντιμετώπιση των θερμικών φορτίων έχει εξεταστεί ενδελεχώς με τη θερμομόνωση να αποτελεί το βασικό εργαλείο μείωσής τους, λιγότερη προσοχή έχει δοθεί στα ψυκτικά φορτία τόσο σε επίπεδο υπολογισμού όσο και σε επίπεδο εφαρμογής μέτρων για την μείωση αυτών. Ωστόσο στις νότιες περιοχές της Ευρώπης, η κατανάλωση ενέργειας για την αντιμετώπιση των ψυκτικών φορτίων βαίνει αυξανόμενη τόσο λόγω της κλιματικής αλλαγής και της διαμόρφωσης δυσμενούς μικροκλίματος μέσα στις πόλεις, ενώ λόγω της διαδεδομένης χρήσης κλιματιστικών συσκευών για την επίτευξη εσωτερικής θερμικής άνεσης κατά τους θερινούς μήνες το πρόβλημα εντείνεται για το εξωτερικό περιβάλλον. Οπότε, ο ικανοποιητικός υπολογισμός των ψυκτικών φορτίων είναι καίριας σημασίας θέμα, προκειμένου να οδηγηθούμε σε κτήρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.

Δύο βασικές κατηγορίες υπολογιστικών μοντέλων διακρίνονται για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων, τα μοντέλα σταθερής και δυναμικής κατάστασης. Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης είναι τα πλέον διαδεδομένα καθώς είναι τα πλέον εύρηστα και εμφανίζουν μικρό υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο θεωρείται ότι υποτιμούν κυρίως τα ψυκτικά φορτία τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δυναμικά φαινόμενα. Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης, κατά τη διαμόρφωση του ενεργειακού ισοζυγίου δε λαμβάνουν υπόψη την αποθήκευση θερμότητας ούτε και την μεταβολή των εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του έτους. Εξέλιξη των αρχικών στατικών μοντέλων αποτελούν αυτά που λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών, όπως η μέθοδος των βαθμομερών[1]. Πιο εξελιγμένα στατικά μοντέλα μπορούν να λάβουν υπόψη τους τη μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών καθώς και τα χαρακτηριστικά της θερμικής αδράνειας των δομικών στοιχείων όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση των κλιματιστικών μονάδων [2].

Στην εργασία [3] παρουσιάζεται μια εκτεταμένη συγκριτική βιβλιογραφική ανασκόπηση δυναμικών μοντέλων που έχουν προταθεί για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων σχετικά με τις δυνατότητές τους να προσομοιώσουν τη λειτουργία πλήθους υποσυστημάτων. Στην εργασία [4] εκτός από τα δυναμικά μοντέλα εξετάζεται η προσέγγιση της θερμικής απόδοσης και μέσω στατιστικών, νευρωνικών και άλλων μεθοδολογιών. Τα δυναμικά μοντέλα από νωρίς χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της επίδρασης της μόνωσης στην ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Για παράδειγμα στην εργασία [5] το μοντέλο DOE-2 εξετάζει όχι μόνο την επίδραση της μόνωσης σε ισόγεια κατοικία σε έξι κλιματικές ζώνες των ΗΠΑ αλλά και τη θέση της μόνωσης στο δομικό στοιχείο. Στην εργασία [6] εξετάζεται επίσης η επίδραση της θερμικής μάζας και συγκρίνονται τα αποτελέσματα έξι δυναμικών μοντέλων με το μοντέλο ημισταθερής κατάστασης του ISO13790 για διώροφο κτήριο σε Σκανδιναβικά κλίματα. Από τη σύγκριση προκύπτει καλή ακρίβεια του ημισταθερού μοντέλου στον υπολογισμό των θερμικών φορτίων με διαφοροποίηση της τάξης του 8% από τα δυναμικά μοντέλα αλλά σημαντική υποτίμηση των ψυκτικών φορτίων της τάξης του 50%, που όμως δεν ενδιαφέρουν την γεωγραφική περιοχή εξέτασης.

Στόχος του άρθρου είναι η προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτηρίου με αριθμητικά μοντέλα α) ημι-σταθερού χρονικού βήματος και β) δυναμικού αλγόριθμου, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της μεθόδου υπολογισμού και η επίδραση του χρονικού βήματος στον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων ενός συγκεκριμένου κτηρίου κατοικίας για διάφορα πάχη θερμομόνωσης και προσανατολισμούς ανοιγμάτων. Μέσω αυτών των προσομοιώσεων γίνεται προσπάθεια να εντοπιστεί το είδος και το εύρος της εξάρτησης φορτίων που εξαρτώνται από τη μέθοδο, το χρονικό βήμα καθώς και την αλληλεπίδραση προσανατολισμού ανοιγμάτων με το πάχος θερμομόνωσης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την προσομοίωση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης του κτηρίου χρησιμοποιήθηκαν δύο υπολογιστικά εργαλεία, τα οποία βασίζονται στο ISO 13790 [7]. Το ένα αποτελεί δυναμικό μοντέλο, το οποίο δίνει την δυνατότητα υπολογισμών με υποπολλαπλάσια της ώρας χρονικά βήματα, ενώ το δεύτερο λογισμικό χρησιμοποιεί την πεπλεγμένη μηνιαία μέθοδο ημι-σταθερής κατάστασης.

Το πρότυπο ΕΛΟΤ ENISO 13790 'Ενεργειακή επίδοση κτιρίων – Υπολογισμός των απαιτήσεων ενέργειας για τη θέρμανση και τη ψύξη των χώρων' περιγράφει τρεις εναλλακτικές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της ετήσιας χρήσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη χώρων κτηρίων κατοικίας ή

τριτογενούς τομέα, μία μηνιαία η εποχιακή ημι-σταθερή, μια απλοποιημένη ωριαία δυναμική και λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης.

Όλες οι μεθοδολογίες περιλαμβάνουν υπολογισμούς που αφορούν: α) τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή-συναγωγή και αερισμό από ένα κτίριο όταν θερμαίνεται ή ψύχεται υπό σταθερή θερμοκρασία, β) τη συνεισφορά των εσωτερικών και ηλιακών κερδών στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου, γ) τον υπολογισμό της ετήσιας ζήτησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη προκειμένου η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου να διατηρηθεί σε προκαθορισμένη θερμοκρασία (θερμοκρασία σχεδιασμού) και δ) τον υπολογισμό της ετήσιας τελικής χρήσης ενέργειας. Βασικό χαρακτηριστικό των μεθόδων που αναπτύσσονται στο πρότυπο είναι η μερική αποσύζευξη του κτιριακού κελύφους από το σύστημα θέρμανσης – ψύξης, η χρήση της λειτουργικής θερμοκρασίας (operative) και όχι της θερμοκρασίας του αέρα ως θερμοκρασίας ελέγχου και η θεώρηση της δισδιάστατης φύσης της μετάδοσης θερμότητας με αγωγιμότητα μέσω της έννοιας των θερμογεφυρών [8, 9, 10, 11].

Το λογισμικό TEE-KENAK [12] υπολογίζει την ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ημισταθερής κατάστασης μηνιαίου βήματος σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται το ισοζύγιο ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου (μήνας) και η επίδραση των δυναμικών φαινομένων λαμβάνεται υπόψη μέσω συντελεστών, οι οποίοι προσδιορίζονται εμπειρικά [13]. Συγκεκριμένα προκειμένου να ληφθούν υπόψη δυναμικά φαινόμενα κατά τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης / ψύξης στη μεθοδολογία, χρησιμοποιείται ο συντελεστής χρήσης κερδών / απωλειών, ο οποίος προκύπτει από την αναλογία κερδών - απωλειών και από τη σταθερά χρόνου του κτηρίου. Αυτός ο συντελεστής καθορίζει το βαθμό κατά τον οποίο τα θερμικά κέρδη είναι ωφέλιμα για την ενεργειακή ζήτηση θέρμανσης και το βαθμό κατά τον οποίο οι θερμικές απώλειες είναι ωφέλιμες για την ενεργειακή ζήτηση ψύξης-δροσισμού. Το λογισμικό TEE-KENAK εφόσον στηρίζεται στο ISO 13790 δε λαμβάνει υπόψη τη λανθάνουσα θερμότητα για ύγρανση και αφύγρανση, όμως λαμβάνει υπόψη έμμεσα το λανθάνον φορτίο των εσωτερικών κερδών που προέρχονται από τους χρήστες εφόσον αυτό δίνεται συνολικά μαζί με το αισθητό φορτίο.

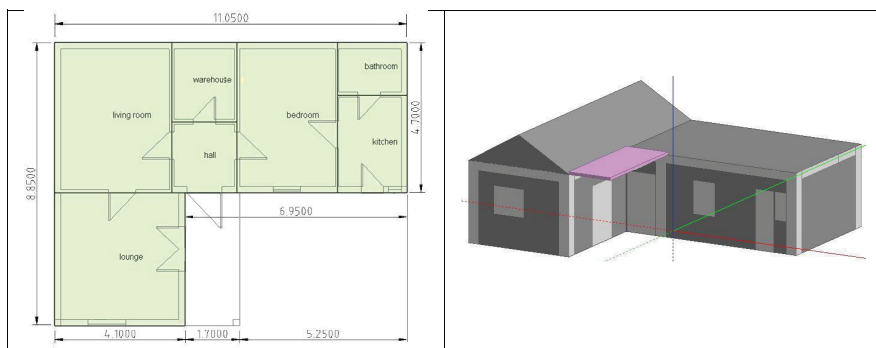
Το λογισμικό δυναμικής προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου ήταν το EnergyPlus [14], το οποίο είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα και έχει δυνατότητα υπολογισμών με χρονικά βήματα ακόμα και μικρότερα της ώρας. Στο λογισμικό αυτό, το οποίο είναι σε θέση χειριστεί και τη μικρού και τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, οι συντελεστές συναγωγής δύναται να υπολογιστούν αυτόματα. Η ροή θερμότητας διαμέσου των δομικών στοιχείων υπολογίζεται με τη μέθοδο των συναρτήσεων μεταφοράς ή εναλλακτικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, θεωρώντας τη μετάδοση θερμότητας μονοδιάστατη, ενώ η μετάδοση θερμότητας μέσω εδάφους γίνεται με τρισδιάστατο μοντέλο. Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο γίνεται μέσω του μοντέλου του Perez. Το λογισμικό υπολογίζει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση του θερμοστατικού ελέγχου στην περίοδο του χρονικού βήματος που ορίζει ο χρήστης με τη μέθοδο της θερμικής ισορροπίας συνεκτιμώντας ταυτόχρονα για κάθε δομικό στοιχείο τη μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας τόσο για την εξωτερική όσο και για την εσωτερική πλευρά του στοιχείου. Χρησιμοποιεί συνδυασμένο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας και αξιοποιεί μοντέλα θερμικής άνεσης τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη χρήση του χώρου, τις τιμές της υγρασίας, της θερμοκρασίας ξηρού βολβού κλπ. Επίσης δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης του φωτισμού καθώς και τον υπολογισμό της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού στη θέρμανση και τη ψύξη. Τέλος αξιολογεί τη συνεισφορά δευτερευόντων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού προκειμένου να αποτιμηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του βασικού εξοπλισμού.

2.1. Περίπτωση εφαρμογής

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μια ισόγεια μονοκατοικία. Το κτήριο έχει σχήμα Γ όπως φαίνεται στο σχήμα 1, με συνολικό εμβαδό 68.95 m² και ύψος 3 m. Τα 36.285 m² καλύπτονται από δίριχτη στέγη πάνω από μονωμένη πλάκα ενώ τα υπόλοιπα από μονωμένο δώμα. Το κτήριο βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη, που ανήκει Γ κλιματική ζώνη της χώρας, με διεύθυνση προσανατολισμού το ΝΔ-ΒΑ άξονα, με κεντρική είσοδο και ανοίγματα στη ΝΔ πλευρά και με γωνία προσανατολισμού $\gamma=224^\circ$. Υπάρχει μόνο ένα άνοιγμα στη ΝΑ πλευρά το οποίο είναι σκιασμένο. Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι σκιάσεις που προκαλούνται από δομικά στοιχεία του ίδιου του κτηρίου και όχι αυτές που οφείλονται σε γειτονικά κτήρια. Τα ανοίγματα καλύπτουν το 8.1% της περιβάλλουσας επιφάνειας του κτηρίου εκ των οποίων τα διαφανή ανοίγματα εκπροσωπούν μόνο το 5.7% αυτής.

Ο φέρων οργανισμός αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα με εξωτερική μόνωση με εξηλασμένη πολυστερίνη ($\lambda=0.038$ W/mK). Η εξωτερική τοιχοποιία είναι δικέλυφη οπτοπλινθοδομή με διάτρητους οπτόπλινθους με μόνωση πυρήνα από διογκωμένη πολυστερίνη ($\lambda=0.038$ W/mK). Η εσωτερική

τοιχοποιία αποτελείται από μονή οπτοπλινθοδομή. Το δάπεδο αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος και φέρει μόνωση τέτοια ώστε να εξασφαλίζονται οι προδιαγραφές του KENAK [15] για τη Γ κλιματική ζώνη. Όλη η οροφή αποτελείται από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με αντεστραμμένη εξωτερική θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη ($\lambda=0.038 \text{ W/mK}$). Ένα τμήμα της οροφής είναι καλυμμένο από στέγη η οποία δεν έχει επιπλέον θερμομόνωση. Τα διαφανή ανοίγματα αποτελούνται από δίδυμο υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm και με επίστρωση μεμβράνης χαμηλής εκπομπής, ενώ τα κουφώματα είναι ξύλινα. Όλα τα διαφανή ανοίγματα πληρούν τις θερμομονωτικές προδιαγραφές των κουφωμάτων της Γ κλιματικής ζώνης. Οι δύο εξωτερικές πόρτες που είναι αδιαφανή ανοίγματα θεωρούνται ότι έχουν συντελεστή θερμοπερατότητας $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Εικόνα 1: Κάτοψη και γεωμετρία εξεταζόμενου κτηρίου

Το κτήριο θερμαίνεται με λέβητα φυσικού αερίου 24kW με βαθμό απόδοσης 92%. Το σύστημα διανομής θερμότητας έχει μόνωση επιπέδου κτηρίου αναφοράς κατά KENAK με βαθμό απόδοσης 94.5%. Τα θερμαντικά σώματα τύπου πάνελ είναι μονάδες απόδοσης θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών 90–70°C με βαθμό απόδοσης 89%. Τα θερμικά φορτία του κτηρίου καλύπτονται πλήρως από το σύστημα θέρμανσης. Η ψύξη του κτηρίου γίνεται από αντλίες θερμότητας διαιρούμενου τύπου, οι οποίες επίσης καλύπτουν το 100% των ψυκτικών φορτίων και έχουν βαθμό ενεργειακής αποδοτικότητας EER=3, χωρίς δίκτυο διανομής και με βαθμό απόδοσης εσωτερικών μονάδων 93%. Οι ανάγκες του κτηρίου σε ζεστό νερό χρήσης (ZNX) καλύπτονται κατά 100% όλο το έτος από τοπικό ηλεκτρικό θερμοσίφωνα.

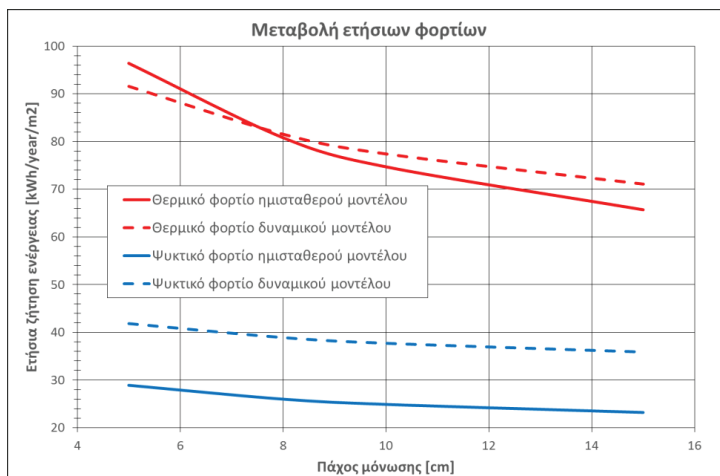
Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα ανάμεσα στο λογισμικό TEE-KENAK και το EnergyPlus υιοθετήθηκε το πρόγραμμα λειτουργίας και οι παραδοχές του KENAK για τη λειτουργία του κτηρίου που αντιστοιχούν σε χρήση κατοικίας. Συνεπώς, η κατοικία θεωρείται ότι λειτουργεί 18 ώρες τη μέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα και 12 μήνες το έτος. Η πυκνότητα πληθυσμού λαμβάνεται 0.05 άτομα/m^2 , με μεταβολική δραστηριότητα 80 W/m^2 και μέσο συντελεστή παρουσίας 0.75. Η εγκατεστημένη ισχύς για φωτισμό ανέρχεται στα 6.4 W/m^2 , η ημερήσια κατανάλωση ZNX στα 1.09 l/m^2 , ενώ η εγκατεστημένη ισχύς λοιπού οικιακού εξοπλισμού είναι 2.14 W/m^2 . Ο απαιτούμενος νωπός αέρας λαμβάνεται $0.75 \text{ m}^3/\text{h/m}^2$, οι θερμοκρασίες σχεδιασμού είναι 20°C για το χειμώνα και 26°C για το καλοκαίρι και η σχετική υγρασία 40%. Τέλος η θερμοχωρητικότητα του κτηρίου λαμβάνεται ίση με $260 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.

Το κτήριο θεωρείται ότι βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη, η οποία βρίσκεται στη Γ κλιματική ζώνη. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό TEE-KENAK χρησιμοποιήσαν τα μετεωρολογικά στοιχεία που δίνονται από την TOTEE 20701-3/2010 [16] για τη Θεσσαλονίκη. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το EnergyPlus χρησιμοποιήσαν αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων (ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, τιμές υγρασίας, θερμοκρασίες) που λήφθηκαν από το λογισμικό METEONORM v7.1 για τη Θεσσαλονίκη. Η μέση τετραγωνική διαφορά (RMS) της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας εικοσιπεντάωρου ανάμεσα στις δύο ομάδες μετεωρολογικών δεδομένων ανέρχεται σε 0.335°C, ενώ η αντίστοιχη ποσοστιαία διαφορά της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι 2.49%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την ανάγκες της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν τρία είδη παραμετρικών μελετών. Η μία αφορούσε το πάχος μόνωσης. Στην περίπτωση αυτή η ενεργειακή απόδοση του εξεταζόμενου κτηρίου εξετάστηκε και με το ημι-σταθερό και με το δυναμικό λογισμικό, με μηνιαίο και ημι-ωριαίο χρονικό βήμα αντίστοιχα για 4 διαφορετικά πάχη μόνωσης: α) 5 cm, β) 8 cm, γ) 10 cm, και δ) 15 cm. Στη 2^η περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μόνο το δυναμικό λογισμικό και εξετάστηκε η ενεργειακή απόδοση του κτηρίου με πάχος μόνωσης 8 cm για 3 διαφορετικά χρονικά βήματα: α) 30 min, β) 15 min, και γ) 1 min. Στην 3^η περίπτωση και πάλι εξετάστηκε η ενεργειακή απόδοση του κτηρίου με πάχος μόνωσης 8 cm και χρονικό βήμα 30 min για διαφορετικούς προσανατολισμούς του κτηρίου: α) ανοίγματα στο Νότο (βασική γεωμετρία του κτηρίου), β) ανοίγματα στο Βορρά, γ) ανοίγματα στην Ανατολή και δ) ανοίγματα στη Δύση.

Στην Εικόνα 2 δίνεται η ετήσια ζήτηση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας υπολογισμένης με ημι-σταθερής κατάστασης μηνιαίο βήμα και δυναμικό μοντέλο με ημι-ωριαίο βήμα για πάχη μόνωσης από 5 έως 10 cm, ανηγμένες στο εμβαδό του κτηρίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ψυκτικά φορτία που υπολογίζονται με το δυναμικό μοντέλο είναι συνολικά (αισθητό και λανθάνον φορτίο) ενώ τα ψυκτικά φορτία που υπολογίζονται με το ημισταθερό μοντέλο αποτελούνται από το αισθητό φορτίο και μέρος μόνο του λανθάνοντος φορτίου, αυτό που αφορά μόνο το μεταβολισμό των χρηστών.



Εικόνα 2. Ετήσια ζήτηση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας [kWh/year/m²]

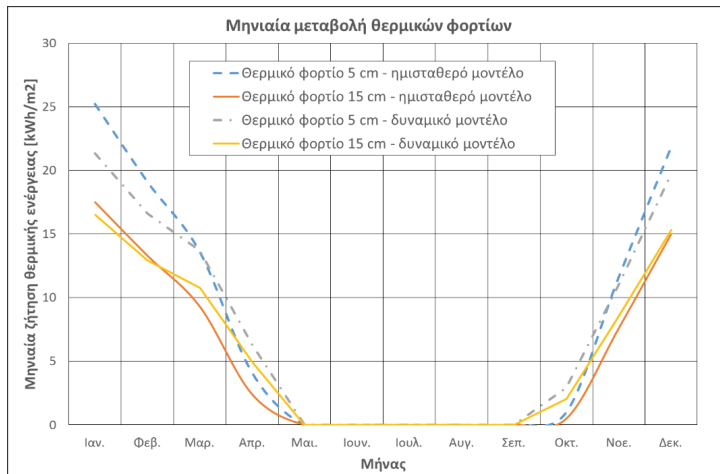
Το ημι-σταθερό μοντέλο πάντα υποτιμά σημαντικά το ετήσιο ψυκτικό φορτίο. Η υποτίμηση αυτή διευρύνεται καθώς το πάχος της μόνωσης αυξάνει από 45% για 5cm σε 54% για πάχος μόνωσης 15cm. Στην περίπτωση του θερμικού φορτίου οι διαφορές είναι πολύ μικρότερες από 1 έως 8%. Για πάχος μόνωσης 5cm το ημι-σταθερό μοντέλο υπερεκτιμά το θερμικό φορτίο ενώ για μεγαλύτερα πάχη το υποτιμά, εμφανίζοντας πάντα για την περίπτωση της θέρμανσης μικρές διαφορές.

Με την αύξηση της μόνωσης τα θερμικά φορτία μειώνονται όπως αναμενόταν και συνολικά βελτιώνονται κατά 32% σύμφωνα με το ημι-σταθερό μοντέλο και κατά 22% σύμφωνα με το δυναμικό μοντέλο. Το μεγαλύτερο μέρος της βελτίωσης αφορά την αύξηση της μόνωσης από τα 5 στα 8 cm οπότε ο ρυθμός μείωσης των θερμικών φορτίων είναι της τάξης του 5% για κάθε εκατοστό πάχους μόνωσης σύμφωνα με το ημι-σταθερό μοντέλο ή 4% σύμφωνα με το δυναμικό μοντέλο. Ο ρυθμός βελτίωσης μειώνεται στο 2% για κάθε εκατοστό του πάχους μόνωσης για μόνωση πάνω από 10 cm.

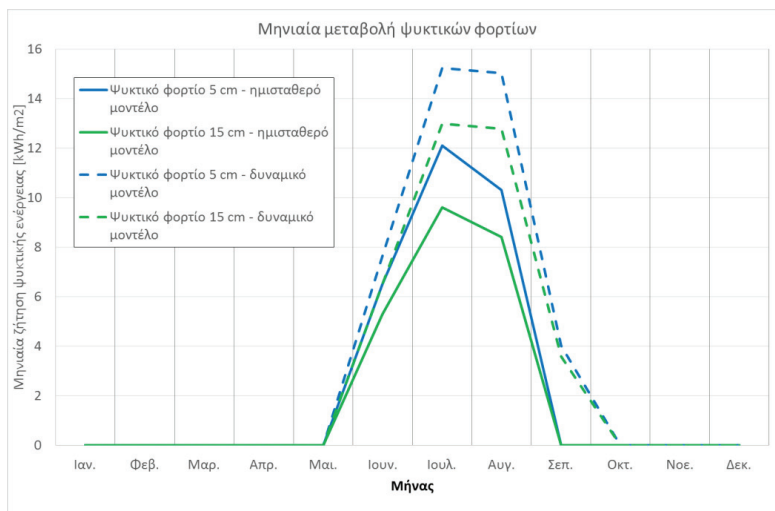
Με την αύξηση της μόνωσης προκύπτει μείωση των ψυκτικών φορτίων. Αυτό συμβαίνει διότι στο κτήριο υπάρχουν πρακτικά μόνο νότια ανοίγματα και ένα ανατολικό καλά σκιασμένο. Η συνολική βελτίωση που επιτυγχάνεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης από τα 5 στα 15 cm είναι 20% με βάση το ημι-σταθερό μοντέλο και 14% με βάση το δυναμικό μοντέλο. Συνεπώς το ημι-σταθερό μοντέλο υπερεκτιμά την επίδραση της μόνωσης στα ψυκτικά φορτία. Και στην περίπτωση των θερμικών φορτίων η αύξηση του πάχους της μόνωσης από 5 σε 8cm επιφέρει για κάθε εκατοστό

πάχους ρυθμό μείωσης 3% με βάση το ημισταθερό και 2% με βάση το δυναμικό μοντέλο, ενώ μετά από εκεί ο ρυθμός αυτός μειώνεται σε 1% μέχρι και τα 15cm μονωτικού υλικού.

Στις Εικόνες 3 και 4 δίνεται η μηνιαία διακύμανση θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα υπολογισμένα με τα δύο μοντέλα για πάχη μόνωσης 5 και 15cm.



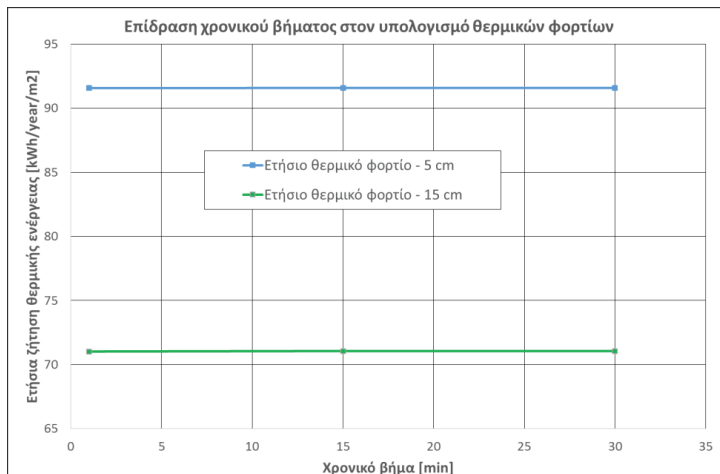
Εικόνα 3. Μηνιαία διακύμανση ζήτησης θερμικής ενέργειας [kWh/m²]



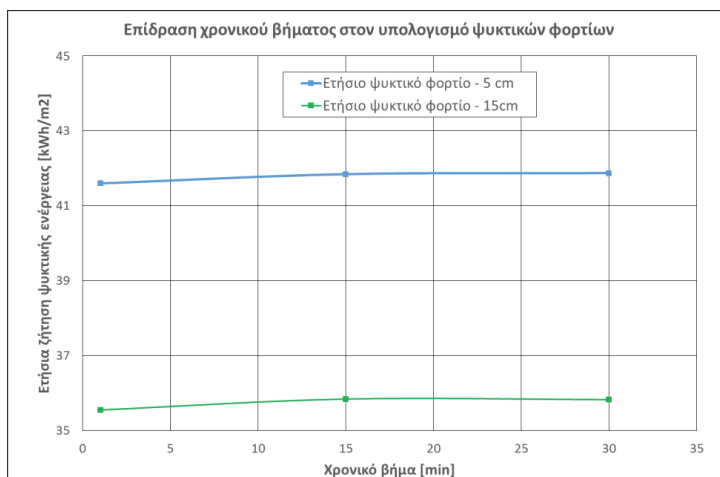
Εικόνα 4. Μηνιαία διακύμανση ζήτησης ψυκτικής ενέργειας [kWh/m²]

Κατά τους χειμερινούς μήνες Ιανουάριο – Φεβρουάριο το ημι-σταθερό μοντέλο πάντα υπερτιμά το θερμικό φορτίο κάτι το οποίο για πάχος μόνωσης 5cm επεκτείνεται και στο Μάρτιο, το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο. Τους υπόλοιπους μήνες το ημι-σταθερό μοντέλο υποτιμά το θερμικό φορτίο με το φαινόμενο να μεγιστοποιείται κατά το Σεπτέμβριο, όπου με βάση τον ΚΕΝΑΚ (και κατ' επέκταση και στο μοντέλο του ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ) να μην υφίσταται ανάγκη θέρμανσης και έτσι το θερμικό φορτίο να μηδενίζεται. Ενώ όσο μειώνεται η εξωτερική θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερο είναι το όφελος που προσφέρει η μόνωση.

Σε ότι αφορά το ψυκτικό φορτίο το ημι-σταθερό μοντέλο πάντα το υποτιμά σημαντικά με την μέγιστη διαφορά να εμφανίζεται και πάλι τον Σεπτέμβριο, για τον οποίο γίνεται η παραδοχή κατά KENAK της μη ύπαρξης ανάγκης ψύξης. Στις Εικόνες 5 και 6, δίνεται η μεταβολή των θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα, συναρτήσει του χρονικού βήματος υπολογισμού του δυναμικού μοντέλου για πάχη μόνωσης 5 και 15 cm.



Εικόνα 5. Μεταβολή ετήσιας θερμικής ζήτησης συναρτήσει του χρονικού βήματος

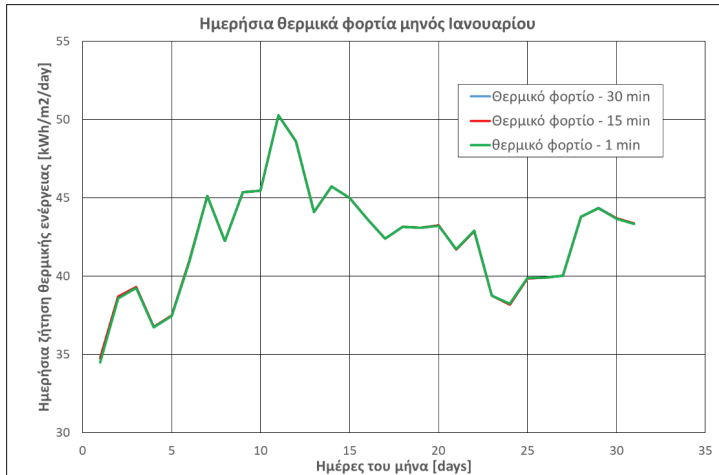


Εικόνα 6. Μεταβολή ετήσια ψυκτικής ζήτησης συναρτήσει του χρονικού βήματος

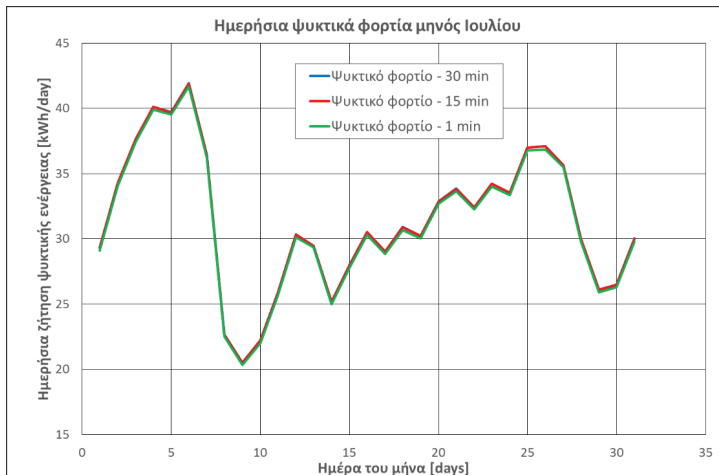
Όπως προκύπτει η επίδραση του χρονικού βήματος στα ετήσια θερμικά φορτία είναι μηδαμινή από 0.01 για πάχος μόνωσης 5 cm έως 0.05% για πάχος μόνωσης 15 cm. Λίγο σημαντικότερη είναι η επίδραση στα ετήσια ψυκτικά φορτία η οποία κυμαίνεται από 0.66% για πάχος 5 cm μέχρι 0.77% για πάχος μόνωσης 15 cm. Συνεπώς το χρονικό βήμα των 30 min φαίνεται ικανό να λάβει υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται στο κτήριο.

Στη συνέχεια εξετάζεται δυνητικά η χρήση χρονικού βήματος μικρότερου των 30 min και εάν αυτό θα μπορούσε να αναδείξει κάποια επιπλέον σημαντική πληροφορία σε ότι αφορά τη διακύμανση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων σε ημερήσια και ωριαία βάση. Στην Εικόνα 7 δίνεται η ημερήσια μεταβολή ζήτησης θερμικής ενέργειας για τον Ιανουάριο με χρονικά βήματα 1, 15 και 30 min. Ενώ

στην Εικόνα 8 δίνεται η ημερήσια μεταβολή ψυκτικών φορτίων για τον Ιούλιο για τα ίδια χρονικά βήματα. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται πάχος μόνωσης 8cm.



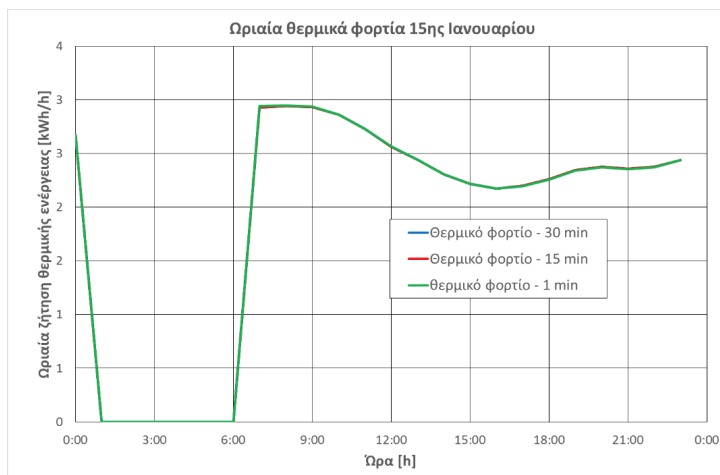
Εικόνα 7. Ημερήσια μεταβολή ζήτησης θερμικής ενέργειας για μήνα Ιανουαρίου



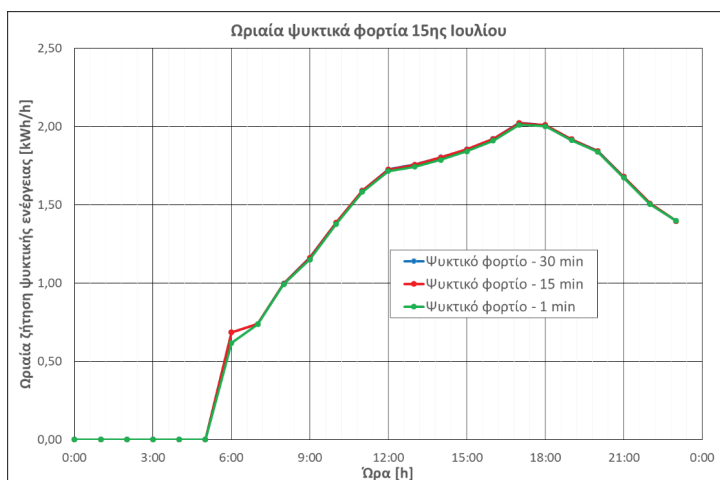
Σχήμα 8. Ημερήσια μεταβολή ζήτησης ψυκτικής ενέργειας για το μήνα Ιούλιο

Όπως προκύπτει και από τα ημερήσια φορτία, η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων σε ότι αφορά τα θερμικά φορτία για το μήνα Ιανουαρίου (τον πλέον ψυχρό μήνα του έτους) είναι τόσο μικρή που δε δικαιολογεί το υπολογιστικό κόστος που θα επέφερε η χρήση χρονικού βήματος μικρότερου των 30 min. Λίγο πιο σημαντική είναι η διαφοροποίηση σε ότι αφορά τα ψυκτικά φορτία με το μεγαλύτερο χρονικό βήμα υπολογισμού να οδηγεί σε ελαφρά υπερτίμηση των ψυκτικών φορτίων.

Στις Εικόνες 9 και 10 δίνεται η ωριαία διακύμανση των θερμικών κατά την 15^η Ιανουαρίου και των ψυκτικών φορτίων κατά τη 15^η Ιουλίου αντίστοιχα με χρονικά βήματα 30, 15 και 1 min για την περίπτωση μόνωσης με πάχος 8 cm.



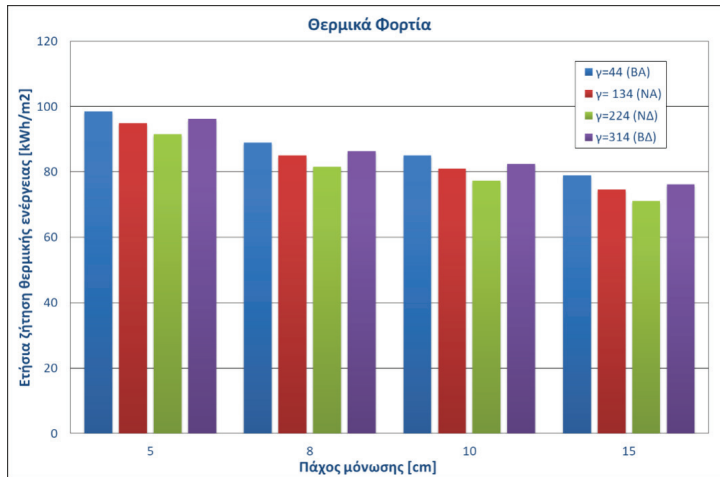
Εικόνα 9. Ωριαία μεταβολή ζήτησης θερμικής ενέργειας για τη 15^η Ιανουαρίου



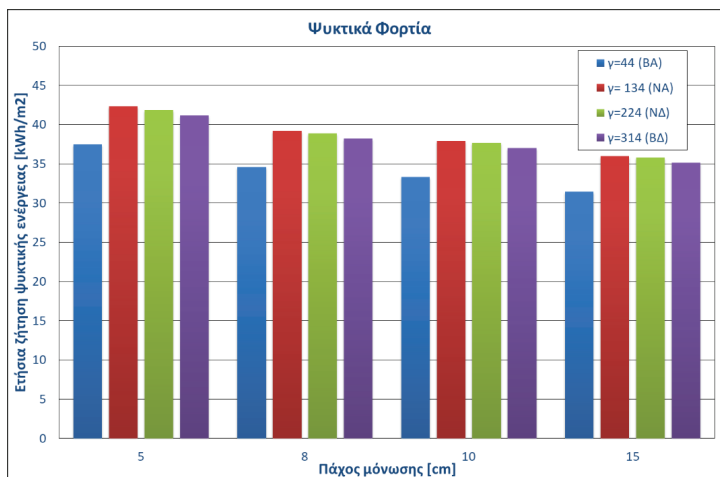
Εικόνα 10 Ωριαία μεταβολή ζήτησης ψυκτικής ενέργειας για τη 15η Ιουλίου

Και στις δύο περιπτώσεις οι μηδενικές τιμές των πρώτων πρωινών ωρών οφείλονται στις σχετικές παραδοχές που αφορούν το ωράριο λειτουργία του κτηρίου. Μικρές διαφοροποιήσεις εντοπίζονται μόνο σε ότι αφορά ψυκτικά φορτία.

Στις Εικόνες 11 και 12 παρατίθενται οι διαμορφώσεις των ετήσιων θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα για διαφορετικούς προσανατολισμούς του κτηρίου συναρτήσει του πάχους μόνωσης. Η γωνία γ αναφέρεται στην κύρια όψη του κτηρίου, η οποία φέρει και τα περισσότερα ανοίγματα, και στο βασικό σενάριο έχει ΝΔ προσανατολισμό. Σε όλες τις περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί ημι-ωριαίο χρονικό βήμα. Οι ΒΑ & ΒΔ προσανατολισμοί της κύριας όψης απαιτούν τα υψηλότερα και χαμηλότερα φορτία θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα, σε αντίθεση με τους ΝΔ & ΝΑ προσανατολισμούς που εμφανίζουν την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά, όπως και αναμενόταν. Αυτό σχετίζεται άμεσα την αρχική αρχιτεκτονική επιλογή των ανοιγμάτων, τα οποία αν και καλύπτουν μικρό ποσοστό της περιβάλλουσας επιφάνειας, συντελούν στην αύξηση των ηλιακών κερδών το χειμώνα, ενώ λόγω κατάλληλης σκίασης αποτρέπουν την είσοδο τους στο εσωτερικό του κτηρίου το καλοκαίρι.



Εικόνα 11. Μεταβολή της ετήσιας ζήτησης θερμικής ενέργειας συναρτήσει του πάχους μόνωσης για διάφορους προσανατολισμούς



Εικόνα 12. Μεταβολή της ετήσιας ζήτησης ψυκτικής ενέργειας συναρτήσει του πάχους μόνωσης για διάφορους προσανατολισμούς

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αύξηση του πάχους μόνωσης από τα 5 στα 15 cm, όπως αναμένεται, μειώνει τα θερμικά φορτία έως και 32% σύμφωνα με το ημι-σταθερό μοντέλο ή έως 22% σύμφωνα με το δυναμικό μοντέλο. Όμως η αποτελεσματικότητα της μόνωσης πάνω από τα 10 cm περιορίζεται, εφόσον προσφέρει μείωση των θερμικών φορτίων μόνο κατά 2% για κάθε εκατοστό επιπλέον πάχους μόνωσης.

Η διαφοροποίηση των θερμικών φορτίων που υπολογίζονται με το δυναμικό μοντέλο κυμαίνεται από 1% έως 8% σε σχέση με αυτά που υπολογίζονται με το ημι-σταθερό μοντέλο, το οποίο τείνει να υπερεκτιμά τα θερμικά φορτία για πάχος μόνωσης μικρότερο από 8 cm και να τα υποτιμά για μεγαλύτερο πάχος, σε σχέση με την στατική θεώρηση. Στην εξεταζόμενη περίπτωση με την αύξηση του πάχους μόνωσης από 5 σε 15cm, φαίνεται να προκύπτει μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά 20%

σύμφωνα με το ημι-σταθερό μοντέλο και κατά 14% σύμφωνα με το δυναμικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ανοίγματα του κτηρίου έχουν μόνο Νότιο προσανατολισμό εκτός από ένα άνοιγμα καλά σκιασμένο στην Ανατολική όψη. Επίσης το ποσοστό των ανοιγμάτων επί της περιβάλλουσας επιφάνειας είναι πολύ μικρό με τα διαφανή ανοίγματα, να καλύπτουν μόνο το 5.7% αυτής. Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της αυξημένης μόνωσης είναι λιγότερο σημαντική στην αντιμετώπιση των ψυκτικών από ότι στα θερμικά φορτία. Αλλά και στην περίπτωση που η μόνωση ξεπερνά τα 10 cmη απομείωση των θερμικών φορτίων είναι της τάξης του 1% για κάθε επιπλέον εκατοστό μόνωσης. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η μεγάλη διαφοροποίηση στα ψυκτικά φορτία που υπολογίζονται με το ημι-σταθερό μοντέλο σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από το δυναμικό. Το ημι-σταθερής κατάστασης μοντέλο δίνει μικρότερες εκτιμήσεις σε σχέση με το δυναμικό, με την τάση αυτή να αυξάνεται με το πάχος της μόνωσης. Συγκεκριμένα, τα ψυκτικά φορτία εμφανίζονται κατά 45% χαμηλότερα για πάχος μόνωσης 5cm και 54% για πάχος μόνωσης 15cm σε σχέση με τις προβλέψεις του δυναμικού μοντέλου. Συνεπώς το ημι-σταθερό μοντέλο δε μπορεί να ακολουθήσει έστω και με γραμμικές αποκλίσεις το δυναμικό αντίστοιχο, σε ότι αφορά τον υπολογισμό των ψυκτικών φορτίων.

Χρονικά βήματα μικρότερα των 30 min δε προσφέρουν σχεδόν καμιά βελτίωση στα αποτελέσματα που αφορούν τα θερμικά φορτία, ενώ πολύ μικρή είναι πρακτικά και η επίδρασή τους στα ψυκτικά φορτία. Παρά το γεγονός ότι η διαφοροποίηση αυξάνεται με το πάχος της μόνωσης, η βελτίωση της ακριβείας δε δικαιολογεί την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και κόστους. Συνεπώς ένα χρονικό βήμα των 30 min μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές για υπολογισμούς θερμικών και ψυκτικών φορτίων.

Η περιστροφή του προσανατολισμού της κύριας όψης του κτηρίου σε συνδυασμό με την αύξηση του πάχους της μόνωσης δεν επιφέρει αλλαγή σειρά που προκύπτει από το βασικό σενάριο. Παράλληλα, τα αποτελέσματα για όλα τα πάχη μόνωσης δεν δείχνουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην συμπεριφορά των θερμικών ή ψυκτικών φορτίων, ενώ ταυτόχρονα επαληθεύουν την ευεργετική συμπεριφορά των νοτίων ανοιγμάτων με την κατάλληλη σκίαση για όλο το εύρος του έτους παρά την μικρή συνολική τους επιφάνεια.

Στην εργασία εξετάστηκε η απόδοση δύο προσεγγίσεων για την προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτηρίου με διαφορετική πολυπλοκότητα, ακριβεία αποτελεσμάτων και υπολογιστικό κόστος. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως σε ότι αφορά τα θερμικά φορτία η διαφοροποίηση στα αποτελέσματα δε δικαιολογεί το επιπλέον υπολογιστικό κόστος της δυναμικής μεθόδου κυρίως όταν πρόκειται για μικρές μονοκατοικίες. Σε μεγαλύτερα όμως κτήρια και κυρίως σε κτήρια του τριτογενούς τομέα, όπου τα ψυκτικά φορτία είναι πολύ σημαντικά, σχεδιασμός βασισμένος σε απλοποιημένα ημισταθερά μοντέλα είναι δυνατό να οδηγήσει σε σοβαρές σχεδιαστικές αστοχίες με σημαντικό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. P. Moustiris, P. T. Nastos, A. Bartzokas, I. K. Larissi, P. T. Zacharia, A. G. Paliatsos, 2014, 'Energy consumption based on heating/cooling degree days within the urban environment of Athens, Greece', *Theoretical and Applied Climatology*, 122 (3–4), pp 517–529
- [2] C.A. Balaras, 1996, 'The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods', *Energy and Buildings* 24, pp.1-10
- [3] D.B. Crawleya, J.W. Hand, M.Kummert, B.T. Griffith, 2008, 'Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs', *Building and Environment* 43, pp. 661–673
- [4] H. Zhao, F.Magoulès, 2012, 'A review on the prediction of building energy consumption', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 3586– 3592
- [5] E.Kossecka, J. Kosny, 2002, 'Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building', *Energy and Buildings* 34, pp. 321–331
- [6] T. Kalema, G. Johannesson, P.Pylsy, P.Hagengran, 2008, 'Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass', *Journal of Building Physics*, Vol. 32(2), pp. 101-130
- [7] ISO 13790E2, 2009, *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. Secondedition

- [8] Κ. Λάσκος, Κ. Αξαρλή, 2009, 'Εφαρμογή του προτύπου EN ISO 13790:2008 για τον υπολογισμό της ενεργειακής ζήτησης για θέρμανση και ψύξη κτιρίου με χρήση προγραμμάτων δυναμικής προσομοίωσης' 9^ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πάφος, Κύπρος, σελ. 175 -185
- [9] Κ.Τ. Παπακώστας, 2002, 'Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση σε κτίρια κατοικιών στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη' 7^ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πάτρα, σελ. 197-204
- [10] A.Tzachanis, V. Kampanas, 2005, 'An experimental investigation into the sufficiency of estimating energy consumption in buildings using constant and variable degree-days concepts', International Conference The integration of the Renewable Energy Systems into the building structure, Patra
- [11] C. Cartalis A. Synodinou, M. Proedrou, A. Tsangrassoulis, M. Santamouris, 2001, 'Medications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region', Energy Conversion and Management 42(14), pp. 1647 – 1656
- [12] ΥΠΕΚΑ ΤΕΕ, 2010, ΤΕΕ-KENAK, http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/tee_kenak
- [13] Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών Εκπαιδευτικό Υλικό Επιθεώρησης Κτηρίων, 2011, "ΘεσμικόΠλαίσιο –Μεθοδολογία Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων", Έκδοση Α', ΥΠΕΚΑ, Αθήνα
- [14] US DOE, 2014, EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations. <http://energyplus.net>
- [15] ΚΥΑ Αρ.Δ6/Β/οικ.5825, 2010, "Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.ΕΝ.Α.Κ.)' ΦΕΚ Β' 407, σελ. 5333-5356
- [16] ΤΟΤΕΕ20701-3/2010,2014, 'Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών', Γ' έκδοση, Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Αθήνα

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ – ΝΕΡΟΥ

Γ. Α. Μουζεβίρης¹, Κ.Τ. Παπακώστας,

¹Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail:[gmouzeviris@gmail.com](mailto:g mouzeviris@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ενεργειακό πρόβλημα είναι σήμερα ένα από τα πλέον σημαντικά θέματα που απασχολούν την παγκόσμια κοινότητα. Η ενέργεια είναι ένα αγαθό με συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, ενώ οι επιπτώσεις από τη χρήση της στο περιβάλλον είναι καθοριστικές. Στο πλαίσιο αυτό διαμορφώθηκε από την ΕΕ το πρόγραμμα με την ονομασία «Ενέργεια 2020», που αφορά την κοινή Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Στρατηγική για την περίοδο 2011-2020. Στόχος του προγράμματος είναι η υλοποίηση του λεγόμενου «πακέτου 20-20-20», δηλαδή 20% παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, 20% μείωση των εκλύμενων ρύπων σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, και 20% εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης από τον Σεπτέμβριο του 2015 εφαρμόζεται η υποχρεωτική οδηγία ErP (Energy related Products) για τον οικολογικό σχεδιασμό και την ενεργειακή σήμανση των συσκευών που καταναλώνουν ενέργεια. Με την εφαρμογή της οδηγίας τα κλασσικά συστήματα θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών θα αντικατασταθούν σταδιακά με συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών. Οι αντλίες θερμότητας (ΑΘ), και ιδιαίτερα οι αντλίες θερμότητας αέρα – νερού, προβλέπεται να διαδοθούν σημαντικά ως συσκευές παραγωγής θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών, οι οποίες μπορούν να παρέχουν συγχρόνως και ψύξη σε κατάλληλες θερμοκρασίες, ανάλογα με τον σχεδιασμό των συστημάτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μιας συγκριτικής ανάλυσης των συντελεστών αποδοτικότητας σε θέρμανση (COP) και ψύξη (EER) των ΑΘ αέρα-νερού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ελληνική αγορά από διάφορες εταιρείες κατασκευής ΑΘ κατά τα τελευταία 5 χρόνια. Η συγκριτική ανάλυση γίνεται με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές των διαφόρων μοντέλων και στηρίζεται στη συσχέτιση των συντελεστών αποδοτικότητας COP και EER, που δίνονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κάθε εταιρείας, με: α) την ονομαστική ισχύ του μηχανήματος, β) τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και γ) τη θερμοκρασία προσαγωγής νερού στο σύστημα θέρμανσης και ψύξης (σύμφωνα με τις συνθήκες Eurovent LCP/A/CHF και Eurovent LCP/A/AC). Εξετάζονται συσκευές με χαμηλή, μέση και υψηλή θερμική και ψυκτική ισχύ, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους κτιρίων, και κυρίως σε εφαρμογές θερμικής άνεσης.

Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επιλογή μιας ΑΘ σε μελέτες σκοπιμότητας και σχεδιασμού συστημάτων, στην εκτίμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας μιας ΑΘ όπως και στον υπολογισμό του εποχιακού της συντελεστή αποδοτικότητας, με δεδομένα τα κτιριακά στοιχεία και τα κλιματολογικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: αντλίες θερμότητας, συστήματα θέρμανσης, συστήματα ψύξης, συντελεστής αποδοτικότητας COP, συντελεστής αποδοτικότητας EER, εξοικονόμηση ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα πλέον σημαντικά θέματα που απασχολούν την παγκόσμια κοινότητα, ιδιαίτερα την τελευταία 20ετία, είναι η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας λόγω πληθυσμιακής και οικονομικής ανάπτυξης. Τα κτίρια κατέχουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό στη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (EU-28) για το έτος 2015 (τελευταία καταγραφή σε ευρωπαϊκό επίπεδο) το ποσοστό αυτό είναι 38.9% (25.4% για τα κτίρια κατοικιών και 13.5% για τον τριτογενή τομέα), ενώ ακολουθούν ο τομέας των μεταφορών με ποσοστό 33.1% και ο τομέας της βιομηχανίας με ποσοστό 25.3%. Αντίστοιχα, για το ίδιο έτος, το ποσοστό της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια ανήλθε στο 59.5% (29% για τα κτίρια κατοικιών και 30.5% για τον τριτογενή τομέα) [1]. Επίσης για το έτος 2012, η θέρμανση χώρων στην ΕΕ-28 αντιπροσώπευε περίπου το 67% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης σε κατοικίες, ακολουθούμενη από τη θέρμανση νερού χρήσης στο 13% [2]. Αντίστοιχα στην Ελλάδα, τα κτίρια συμμετείχαν στην τελική κατανάλωση ενέργειας με ποσοστό 38% (26.7% και 11.3% για τα κτίρια κατοικιών και τριτογενή τομέα αντίστοιχα) και στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας με ποσοστό 69.8% (39.5% και 30.3% για τα κτίρια κατοικιών και τον τριτογενή τομέα αντίστοιχα) [1].

Η σημαντική κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια ώθησε τις περισσότερες χώρες να θέσουν ως προτεραιότητα στην ενεργειακή τους πολιτική την εξοικονόμηση ενέργειας. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο η ΕΕ διαμόρφωσε το πρόγραμμα «Ενέργεια 2020», το οποίο αφορά την κοινή Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Στρατηγική για την περίοδο 2011-2020. Κύριος άξονας αυτής της στρατηγικής είναι η υλοποίηση του «πακέτου 20-20-20», δηλαδή η επίτευξη 3 στόχων: α) η αύξηση στο 20% της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας, β) η μείωση κατά 20% των εκλυόμενων ρύπων σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 και γ) η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% (δηλαδή εξοικονόμηση στην τελική κατανάλωση ενέργειας κατά 20%). Στα πλαίσια αυτής της πολιτικής εκδόθηκαν από την ΕΕ μία σειρά από οδηγίες, τις οποίες εφάρμοσαν άμεσα τα κράτη – μέλη με την ενσωμάτωσή τους στο δικό τους νομικό πλαίσιο. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής ζήτησης στα κτίρια αφορά τον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης, η ΕΕ προχώρησε το Σεπτέμβριο του 2015 στη θέσπιση της ευρωπαϊκής οδηγίας Energy-related Products (ErP), σύμφωνα με την οποία όλες οι συσκευές για τη θέρμανση χώρων και παρασκευής και αποθήκευσης θερμού νερού χρήσης, καθώς και τα συστήματα που περιλαμβάνουν συσκευές αυτού του τύπου, πρέπει να πληρούν ορισμένες προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης. Η οδηγία αυτή αποτελείται από δύο κύρια μέρη: 1) τον οικολογικό σχεδιασμό (ecodesign), όπου καθορίζονται τα ελάχιστα όρια ενεργειακής απόδοσης και η έκταση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων που συνδέονται με την ενέργεια και 2) την ενεργειακή σήμανση (energy labeling), κατά την οποία είναι υποχρεωτική η ενεργειακή ταξινόμηση αυτών των προϊόντων. Με την εφαρμογή της οδηγίας οδηγήσατε πλέον στην παραγωγή προϊόντων υψηλότερων αποδόσεων, με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Μία από τις επιπτώσεις της οδηγίας είναι η αντικατάσταση των συστημάτων θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών νερού με αντίστοιχα συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών νερού. Μία από τις συσκευές παραγωγής θερμού νερού χαμηλών θερμοκρασιών σε συστήματα θέρμανσης, είναι και οι αντλίες θερμότητας αέρα – νερού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνησει, να καταγράψει και να παρουσιάσει τις αποδόσεις αντλιών θερμότητας αέρα – νερού που διατίθενται στην Ελλάδα τα τελευταία 5 χρόνια από διάφορες εταιρείες, πραγματοποιώντας μία συγκριτική ανάλυση των συντελεστών αποδοτικότητάς τους σε θέρμανση (COP) και ψύξη (EER). Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση αυτή αφορά 114 μοντέλα ΑΘ από 8 εταιρείες, οι οποίες αλφαριθμητικά είναι: Carrier [3], Climaveneta [4], Daikin [5], Hitachi [6], LG [7], Mitsubishi [8], Trane [9] και York [10].

2. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο όρος «αντλία θερμότητας» αναφέρεται σε ένα μηχανήμα, συσκευή ή εγκατάσταση που μεταφέρει θερμότητα από το φυσικό περιβάλλον, δηλαδή τον αέρα, το νερό ή το έδαφος, σε κτίρια, με την αναστροφή της φυσικής ροής της θερμότητας κατά τρόπο ώστε να ρέει από χαμηλότερη σε υψηλότερη θερμοκρασία για τις αναστρέψιμες αντλίες θερμότητας, μπορεί επίσης να μεταφέρει θερμότητα από το κτίριο στο φυσικό περιβάλλον [11]. Ανάλογα με το μέσο της δεξαμενής θερμότητας και το μέσο στο οποίο αποδίδεται η θερμότητα, οι ΑΘ χωρίζονται σε: αέρα-νερού και αέρα-αέρα (αερόψυκτες), νερού-αέρα και νερού-νερού (υδροψυκτες), εδάφους-νερού και εδάφους-αέρα.

Οι αντλίες θερμότητας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για θέρμανση και ψύξη σε κτίρια, διότι μολονότι απαιτούν για τη λειτουργία τους ηλεκτρική ενέργεια με μεγάλο κόστος και υψηλό ανθρακικό

αποτύπωμα, η περισσότερη ενέργεια που παρέχουν μπορεί να αντληθεί από ανανεώσιμες πηγές του περιβάλλοντος που θεωρούνται ανεξάντλητες και μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος. Επιπλέον έχουν αυξημένη απόδοση σε σχέση με συσκευές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Ο συντελεστής αποδοτικότητας των ΑΘ είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την καναλισκόμνη ισχύ. Σε λειτουργία θέρμανσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$COP = \frac{\text{Αποδιδόμενη θερμική ισχύς}}{\text{Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς}} \quad (1)$$

Αντίστοιχα για τη ψύξη η σχέση υπολογισμού είναι:

$$EER = \frac{\text{Αποδιδόμενη ψυκτική ισχύς}}{\text{Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς}} \quad (2)$$

Οι ετήσιες θερμικές ανάγκες (για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης) ανά κατοικία στην Ελλάδα είναι περίπου 12 MWh [2, 15]. Ένα σύστημα θέρμανσης με ΑΘ, της οποίας ο εποχιακός συντελεστής αποδοτικότητας SCOP (ίσος με την αποδιδόμενη θερμική ενέργεια προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης) είναι λίγο μεγαλύτερος από 3, μπορεί να παράγει αυτά τα 12 MWh θερμική ενέργεια με περίπου 3.5 MWh ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι ο συντελεστής μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή στην Ελλάδα είναι 2.9 [12], για να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια των 3.5 MWh απαιτούνται περίπου 10 MWh πρωτογενούς ενέργειας. Δηλαδή, εάν SCOP>3 τότε ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς την πρωτογενή ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι μεγαλύτερος από 1, και επομένως περισσότερη θερμότητα ανακτάται από το περιβάλλον από ότι καταναλώνεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι πρώτες αντλίες θερμότητας διέθεταν συμπιεστή σταθερών στροφών, ο οποίος μπορούσε να λειτουργεί μόνο σε πλήρη ισχύ και συνεπώς έπρεπε να εκκινεί και να σταματά συνεχώς για να διατηρήσει μια ορισμένη θερμοκρασία. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, άρχισαν να τοποθετούνται στις ΑΘ συμπιεστές περιστροφικοί (rotary), σπειροειδείς (scroll) και κοχλιωτοί (screw), διβάθμιοι ή προοδευτικής λειτουργίας με αντιστροφή συχνότητας (inverter), οι οποίοι σταδιακά αύξησαν τους συντελεστές αποδοτικότητας των ΑΘ. Ιδιαίτερα, με την τεχνολογία inverter με την οποία μειώνεται η ισχύς εξόδου από την ΑΘ σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο και έτσι μπορεί να ελέγχονται με ακρίβεια οι θερμοκρασίες εξόδου, η εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με τα μοντέλα σταθερής ταχύτητας είναι 30÷45% [13].

Σε κεντρικές εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης, στις οποίες η θερμότητα ή η ψύξη παρέχεται και διανέμεται με τη μορφή θερμού ή ψυχρού νερού σε ένα σύνολο χώρων (π.χ. συστήματα κλιματισμού με νερό και είτε θερματικές συσκευές τύπου Fan-coil είτε ενδοδαπέδιες σωληνώσεις, ή συστήματα κλιματισμού με αέρα και κεντρικές κλιματιστικές μονάδες), ο πιο συνηθισμένος τύπος ΑΘ που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι η ΑΘ αέρα-νερού. Διακρίνονται σε ενιαίου τύπου (monoblock) και διαιρετού τύπου (split-system).

Η χρήση ΑΘ αέρα-νερού σε ένα σύστημα θέρμανσης-ψύξης έχει πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό κόστος λειτουργίας [14,15] ο υψηλός βαθμός απόδοσης σε χαμηλές θερμοκρασίες νερού, η απλή εγκατάσταση χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις χώρου, η λειτουργία χωρίς έκλυση ρύπων σε τοπικό επίπεδο και η εκμετάλλευση με υψηλή αποδοτικότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ. Στα μειονεκτήματα των ΑΘ αέρα-νερού μπορούν να συμπεριληφθούν το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης, και η επίδραση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα στο συντελεστή αποδοτικότητας, καθώς σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα ο συντελεστής αποδοτικότητας της ΑΘ μειώνεται αισθητά. Επίσης, στα συστήματα μόνο θέρμανσης στα οποία τοποθετούνται κοινά θερμαντικά σώματα νερού π.χ. τύπου PANEL, απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες οι οποίες αυξάνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας του νερού.

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία συλλέχθηκαν από τα databooks 114 μοντέλων 8 εταιρειών. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι εταιρείες με τα αντίστοιχα μοντέλα τους. Η συλλογή των στοιχείων έγινε είτε από το διαδίκτυο (όπου αυτό ήταν δυνατόν) είτε μέσω επικοινωνίας με τον αντιπρόσωπο της εταιρείας στην Ελλάδα. Από τα databook καταγράφηκαν η ονομαστική θερμική και ψυκτική ισχύς (W), η απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ (W) και ο αντίστοιχος συντελεστής αποδοτικότητας σε θέρμανση και ψύξη (COP και EER) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από την ΑΘ. Οι αποδόσεις των ΑΘ όλων των εταιρειών του δείγματος είναι υπολογισμένες σύμφωνα με το πρότυπο EN14511-3 [16].

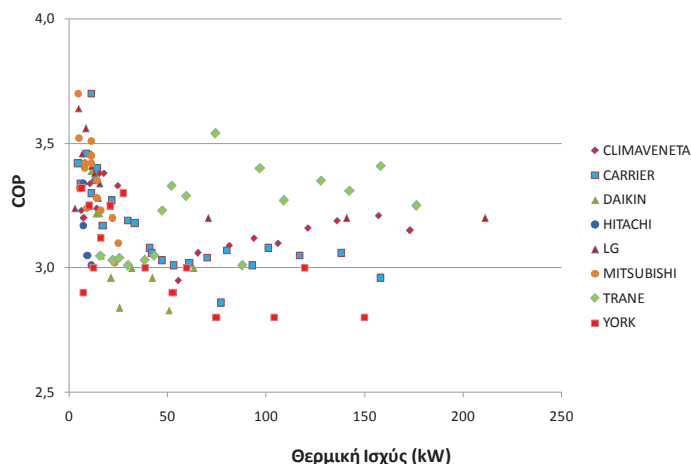
Πίνακας 1: Κατασκευάστριες εταιρείες ΑΘ και τα εξεταζόμενα μοντέλα

ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ
CARRIER	38AW 050/80AWH 065	CLIMAVENETA	AWR MTD2 XE 011	DAIKIN	ERHQ-BW1 - 011	MITSUBISHI	PUHZ W50VHA2(-BS)
	38AW 065/80AWH 065		AWR MTD2 XE 025		ERHQ-BW1 - 014		PUHZ-W85VHA2(-BS)
	38AW 090/80AWH 115		AWR MTD2 XE 031		ERHQ-BW1 - 016		PUHZ-W112VHA(-BS)
	38AW 115/80AWH 115		AWR MTD2 XE 041		EWYQ-BA 016		PUHZ-HW112VHA2(-BS)
	38AW 120/80AWH 150		AWR MTD2 XE 051		EWYQ-BA 021		PUHZ-SW120VHA(-BS)
	38AW 150/80AWH 150		AWR MTD2 XE 061		EWYQ-BA 025		SUHZ-SW45VA/VAH
	30RQ 017		AWR MTD2 XE 091		EWYQ-BA 032		PUHZ-SW50VKA(-BS)
	30RQ 021		NECS-N / B 0202T		EWYQ-BA 040		PUHZ-SW75VHA(-BS)
	30RQ 026		NECS-N / B 0252T		EWYQ-BA 050		PUHZ-SW100VHA(-BS)
	30RQ 033		NECS-N / B 0302T		EWYQ-BA 064		PUHZ-SW120VHA(-BS)
	30RQ 040		NECS-N / B 0352T	TRANE	CXA 040		PUHZ-SW160YKA(-BS)
	30RQS 039		NECS-N / B 0412T		CXA 060		PUHZ-SW200YKA(-BS)
	30RQS 045		NECS-N / B 0452T		CXA 070		PUHZ-SHW80VHA(-BS)
	30RQS 050		NECS-N / B 0512T		CXA 080		PUHZ-SHW112VHA(-BS)
	30RQS 060		NECS-N / B 0552T		CXA 105		PUHZ-SHW140YHA(-BS)
	30RQS 070		NECS-N / B 0612T		CXA 115		PUHZ-SHW230YKA2
	30RQS 078		AHUW036A2 (HU031 U42)		FLEX 140Z		YLHA PLUS 5
	30RQS 080		AHUW056A2 (HU051 U42)		FLEX 145Z		YLHA PLUS 7
	30RQS 090		AHUW076A2 (HU071 U42)		FLEX 150Z		YLHA PLUS 9
	30RQS 100		AHUW096A2 (HU091 U42)		FLEX 165Z		YLHA PLUS 12
30RQS 120	AHUW126A2 (HU121 U32)	FLEX 170Z	YLHA PLUS 15				
30RQS 140	AHUW146A2 (HU141 U32)	FLEX 180Z	YLHA PLUS 20				
30RQS 160	AHUW166A2 (HU161 U32)	FLEX 190Z	YLHA PLUS 27				
HITACHI	RHUE-3 AVHN1	LG	AHUW128A2 (HU123 U32)	FLEX 1105Z	YORK	YLHA 40	
	RHUE-3 AVHN-HM		AHUW148A2 (HU143 U32)	FLEX 1120Z		YLHA 50	
	RHUE-4 AVHN-HM		AHUW168A2 (HU163 U32)	FLEX 1130Z		YLHA 60	
	RHUE-5 AVHN-HM		ACHH020LBAA	FLEX 1150Z		YLHA 80	
	RHUE-6 AVHN-HM		ACHH040LBAA			YLHA 100	
			ACHH060LBAA			YLHA 120	
				YLHA 150			

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

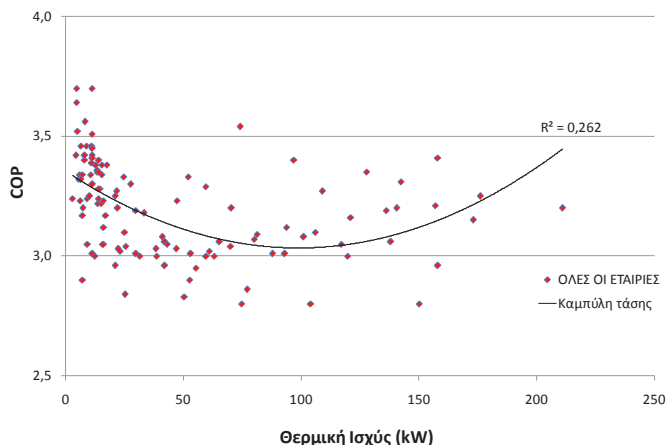
4.1. Συσχέτιση συντελεστών αποδοτικότητας (COP, EER) με τη θερμική και ψυκτική ισχύ

Οι συντελεστές αποδοτικότητας των διαφόρων μοντέλων είτε καταγράφηκαν από τα databook των εταιρειών, όπου υπήρχαν ως δεδομένα, είτε υπολογίστηκαν έμμεσα από την θερμική ή ψυκτική ισχύ και την αντίστοιχη απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος. Για να υπάρχει ένα κοινό μέτρο σύγκρισης, η θερμική ισχύς (kW) και ο COP αναφέρονται σε θερμοκρασία εξωτερικού αέρα 7°C και θερμοκρασία εξόδου ζεστού θερμού νερού 45°C ($\Delta T=5K$) ενώ η ψυκτική ισχύς (kW) και ο EER σε θερμοκρασία εξωτερικού αέρα 35°C και θερμοκρασία εξόδου ψυχρού νερού 7°C ($\Delta T=5K$). Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας σε θέρμανση COP, συναρτήσει της θερμικής ισχύος ανά εταιρεία.



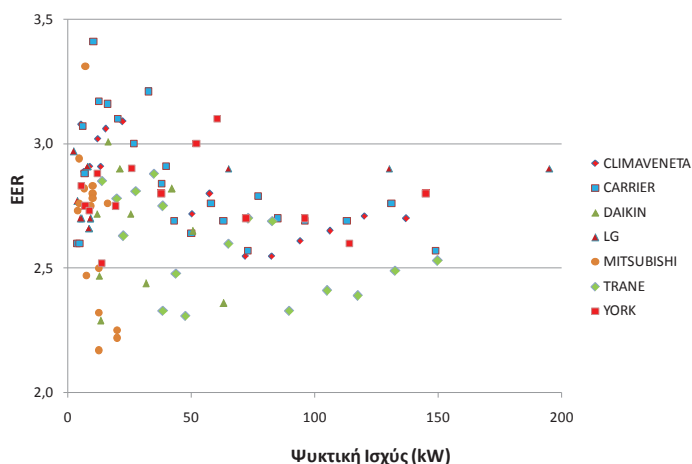
Εικόνα 1: Συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία)

Στην εικόνα 2 η απεικόνιση του COP γίνεται συγκεντρωτικά για όλες τις εταιρείες και διακρίνεται και η καμπύλη τάσης του διαγράμματος διασποράς. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, σε χαμηλές τιμές θερμικής ισχύος (έως 25 kW) ο COP είναι υψηλός για τα περισσότερα μοντέλα του δείγματος, με τιμές από 3 έως 3.7. Στη συνέχεια, σε μεγαλύτερη θερμική ισχύ τείνει μειούμενος έως ένα ελάχιστο (περίπου στα 100kW με τιμή COP~3.05) ενώ στη συνέχεια αυξάνεται με τη θερμική ισχύ, με τιμές μεταξύ 3 και 3.4, εκτός κάποιων εξαιρέσεων.

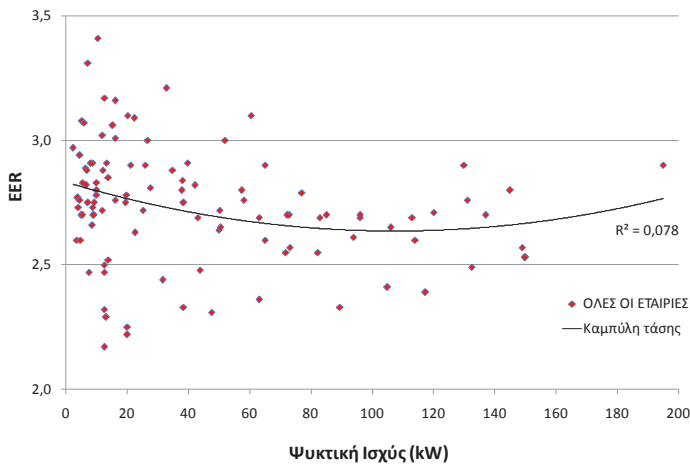


Εικόνα 2: Συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (συγκεντρωτικά)

Αντίστοιχα, στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας σε ψύξη EER σε συνάρτηση με την ψυκτική ισχύ ανά εταιρεία, ενώ στην εικόνα 4 ο EER παρουσιάζεται συγκεντρωτικά για όλες τις εταιρείες. Στην περίπτωση της ψύξης τα σημεία του διαγράμματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά και η καμπύλη τάσης που προκύπτει είναι παρόμοια με αυτή της εικόνας 2 αλλά με μικρότερο συντελεστή προσδιορισμού (R^2). Οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας παρατηρούνται στην περιοχή ψυκτικής ισχύος έως 25 kW ενώ οι τιμές του EER είναι χαμηλότερες από τον αντίστοιχο στη θέρμανση με τιμές ανάμεσα στο 2.5 και 3.0 στα περισσότερα μοντέλα.



Εικόνα 3: Συντελεστής αποδοτικότητας EER σε συνάρτηση με την ψυκτική ισχύ (ανά εταιρεία)



Εικόνα 4: Συντελεστής αποδοτικότητας EER σε συνάρτηση με την ψυκτική ισχύ (συγκεντρωτικά)

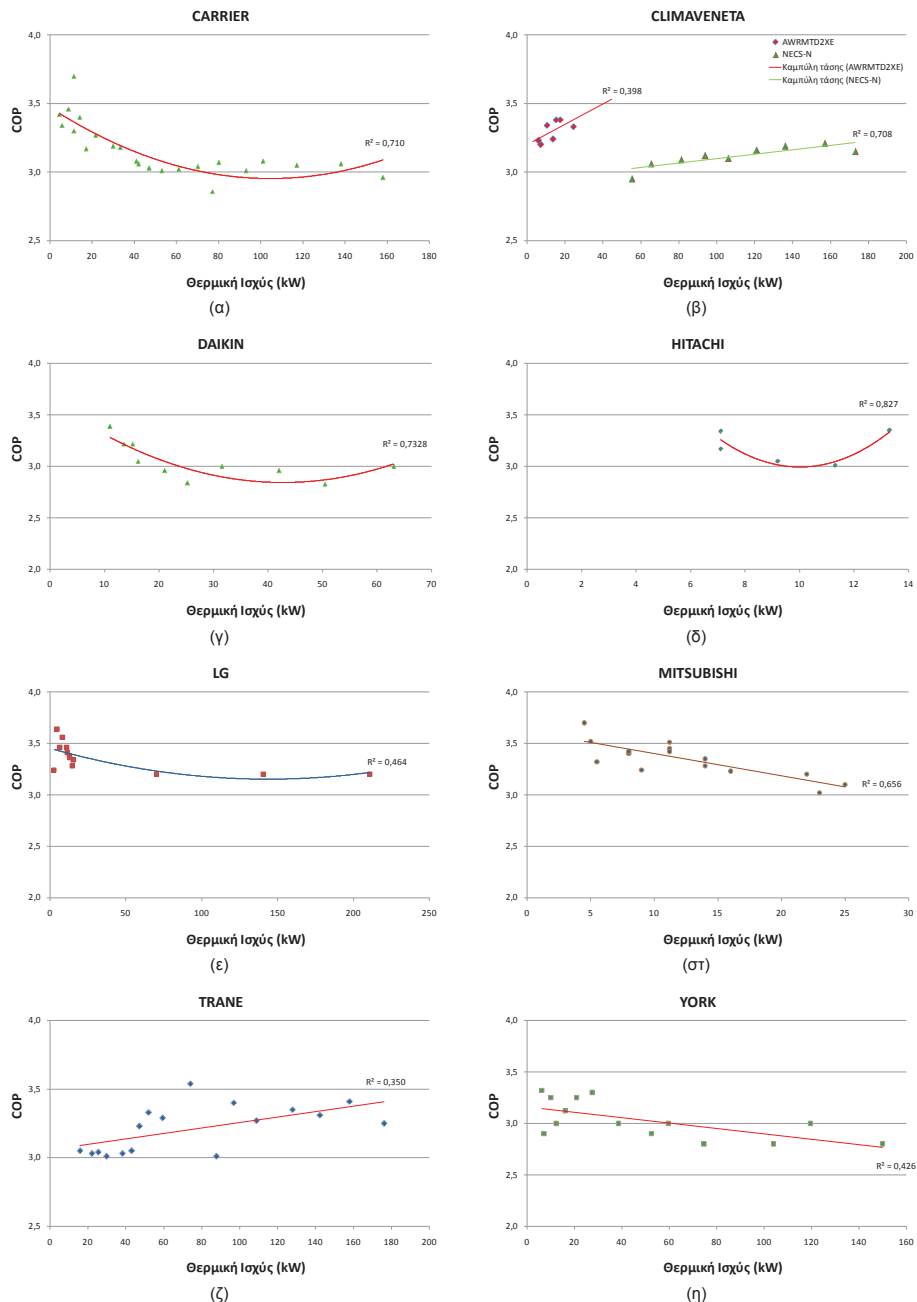
Στην εικόνα 5 απεικονίζονται τα διαγράμματα συσχέτισης του COP με την αποδιδόμενη θερμική ισχύ για κάθε εταιρεία ξεχωριστά. Όπως φαίνεται στην εικόνα, το εύρος της θερμικής ισχύος των διαφόρων μοντέλων ΑΘ δεν είναι κοινό για όλες τις εταιρείες, δηλαδή σε κάποιες κυμαίνεται από χαμηλές έως υψηλές τιμές θερμικής ισχύος ενώ σε κάποιες δεν υπερβαίνει τα 15 ή 25 kW. Γενικά δεν διακρίνεται κάποια σταθερή συσχέτιση μεταξύ του COP και της θερμικής ισχύος. Σε κάποιες εταιρείες ο συντελεστής COP αυξάνεται όσο αυξάνει η θερμική ισχύς (γραφήματα β και ζ), σε άλλες μειώνεται (γραφήματα στ και η), και σε άλλες μειώνεται με την αύξηση της θερμικής ισχύος και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε κάποια σχεδόν σταθερή τιμή (γραφήματα α, γ και ε). Η περίπτωση του διαγράμματος (δ) είναι ιδιαίτερη αλλά το εύρος της θερμικής ισχύος είναι μικρό. Επίσης στο διάγραμμα (β) παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης ξεχωριστά για κάθε τύπο ΑΘ της εταιρείας γιατί μια συνολική καμπύλη θα αλλοίωνε την τάση συμπεριφοράς του COP.

Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα συσχέτισης του EER με την ψυκτική ισχύ για κάθε μία εταιρεία ξεχωριστά. Λείπει το γράφημα μιας εταιρείας γιατί τα μοντέλα που προσφέρει λειτουργούν μόνο σε θέρμανση. Από τα γραφήματα της εικόνας προκύπτει κατά κύριο λόγο μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ του EER και της ψυκτικής ισχύος (γραφήματα α, β, γ, ε και στ). Στο γράφημα (δ) και για μικρές τιμές ψυκτικής ισχύος παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών του EER ενώ για μεγαλύτερες τιμές ισχύος ο EER είναι περίπου σταθερός (με τιμή ~2.8). Τέλος στο διάγραμμα (ζ) παρατηρείται επίσης μεγάλη διασπορά των τιμών του EER, αν και θα μπορούσε να πει κανείς ότι ο EER στις εταιρείες που προσφέρουν μοντέλα με μεγάλη ψυκτική ισχύ ο EER είναι περίπου σταθερός (με μικρές αποκλίσεις) μετά από κάποια τιμή ψυκτικής ισχύος (>70kW).

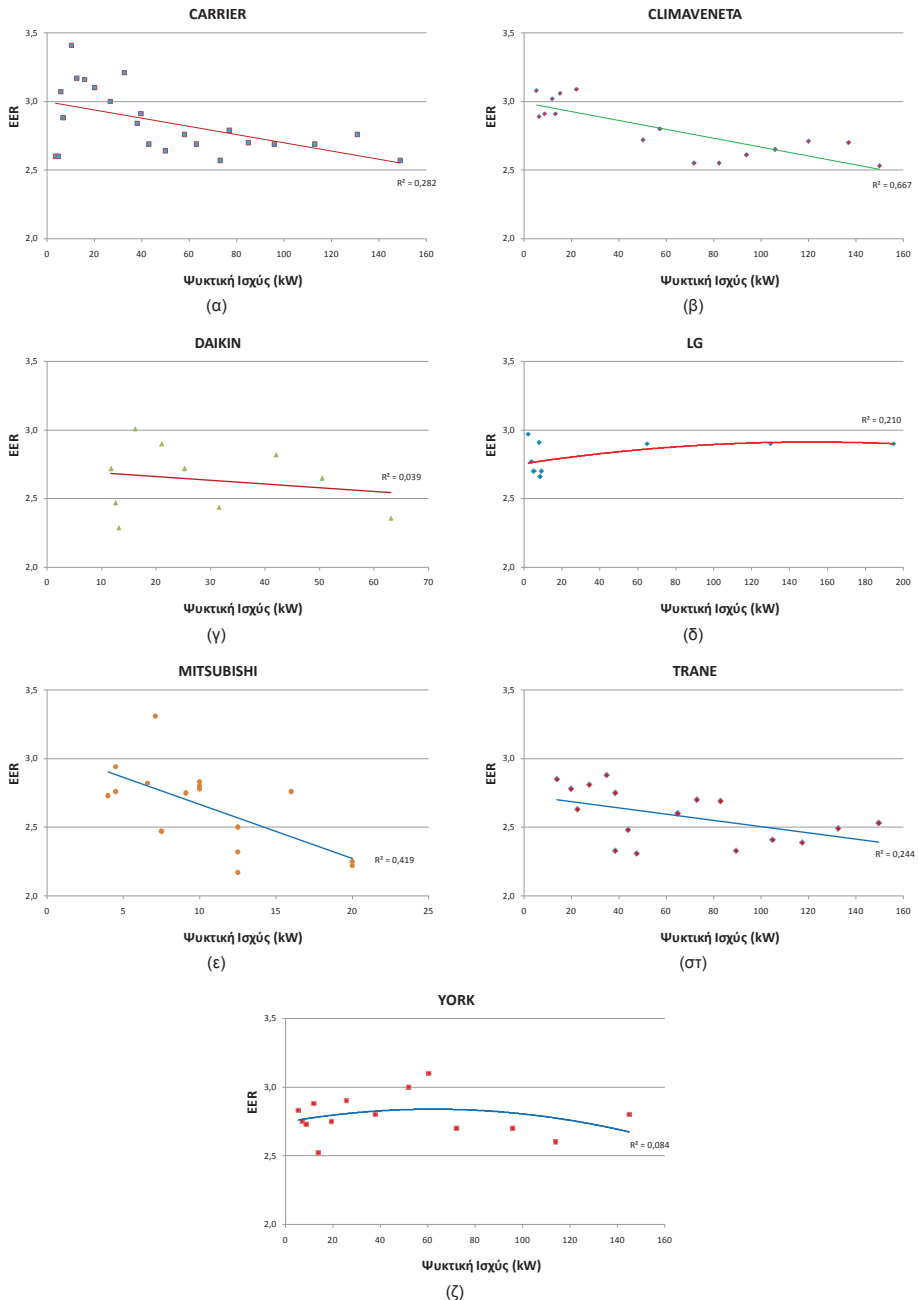
4.2. Συσχέτιση συντελεστών αποδοτικότητας με τη διαφορά θερμοκρασίας εξόδου νερού από την ΑΘ και εξωτερικού αέρα

Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα ($T_{\text{εξ.ωτ. αέρα}}$) όπως και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από την ΑΘ ($T_{\text{εξόδου νερού}}$) έχουν σημαντική επίδραση στους συντελεστές αποδοτικότητας, γιατί καθορίζουν έμμεσα τις θερμοκρασίες και πιέσεις ανάμεσα στις οποίες εκτελείται ο ψυκτικός κύκλος λειτουργίας της ΑΘ. Γενικά, η απόδοση μιας αντλίας θερμότητας αυξάνεται όσο μειώνεται η διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία της πηγής και του αποδέκτη θερμότητας. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, η διαφορά αυτή πρέπει να ελαχιστοποιείται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα εγκαθιστώντας μεγάλες επιφάνειες ακτινοβολίας (π.χ. ενδοδαπέδια ή ενδοτοιχία συστήματα) ή θερμαντικά σώματα με εξαναγκασμένη συναγωγή, δηλαδή με ανεμιστήρα (π.χ. Fan-coils).

Στην παρούσα εργασία, από τα δεδομένα των κατασκευαστών για τα διάφορα μοντέλα, υπολογίστηκε ο συντελεστής αποδοτικότητας σε θέρμανση COP σε σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_{\text{εξόδου νερού}} - T_{\text{εξ.ωτ. αέρα}}$, και σε ψύξη EER σε σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_{\text{εξ.ωτ. αέρα}} - T_{\text{εξόδου νερού}}$, με βήμα 5°C. Το ελάχιστο και μέγιστο όριο του ΔT δεν είναι κοινό για όλες τις εταιρείες και προκύπτει από το εύρος εξωτερικών θερμοκρασιών για τις οποίες δίνει στοιχεία η κάθε εταιρεία.



Εικόνα 5: Συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία)

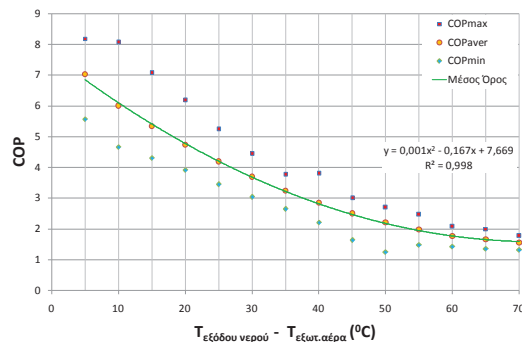


Εικόνα 6: Συντελεστής αποδοκότητας EER σε συνάρτηση με την ψυκτική ισχύ (ανά εταιρεία)

Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη τιμή του συντελεστή αποδοκότητας COP συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας από όλο το δείγμα, ενώ στην εικόνα 8 φαίνονται οι

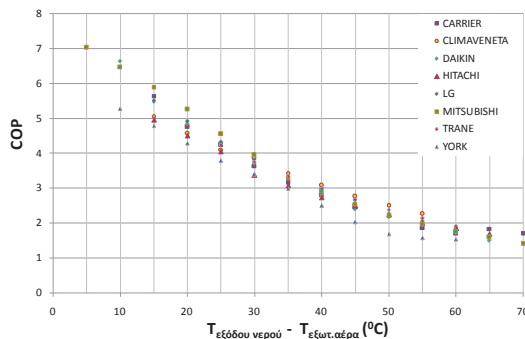
μέσες τιμές του COP από τα μοντέλα που προσφέρει κάθε εταιρεία ξεχωριστά. Τα όρια της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT είναι από 5K έως 70K και προέκυψαν από τα δεδομένα στα databooks των εταιρειών. Οι τιμές του COP κυμαίνονται από 1.2 έως 8.1, αν και μια τόσο υψηλή τιμή είναι τελείως θεωρητική γιατί απαιτεί μια πολύ μικρή θερμοκρασιακή διαφορά. Η ΔT που προκύπτει σε εφαρμογές των ΑΘ για θέρμανση στην Ελλάδα κυμαίνεται συνήθως από 20K (π.χ. για θερμοκρασία εξόδου νερού στην ΑΘ 35°C σε εγκαταστάσεις ενδοδαπέδιας θέρμανσης και εξωτερική θερμοκρασία αέρα 15°C) έως 60K (π.χ. για θερμοκρασία νερού 50°C σε εγκαταστάσεις με fan-coils και εξωτερική θερμοκρασία αέρα -10°C).

Όσο αυξάνεται η ΔT , δηλαδή μειώνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και αυξάνει η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα θέρμανσης, τόσο ελαττώνεται ο COP. Στις μικρές διαφορές ΔT η μείωση του COP είναι 1÷1.5 ανά 10°C, ενώ όσο μεγαλώνει η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT η μεταβολή του COP μειώνεται αλλά οι τιμές του είναι χαμηλές. Επίσης, το εύρος των ακραίων τιμών του COP ($COP_{max} - COP_{min}$) είναι περίπου 2.5 για $\Delta T=5\div 20K$ και μειώνεται περίπου στο 1.5 για $\Delta T=40\div 50K$, δηλαδή υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις αποδόσεις των διαφόρων μοντέλων για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Τα εύρη αυτών των αποκλίσεων δεν φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 8 διότι οι τιμές που απεικονίζονται είναι μέσες τιμές των συντελεστών COP από όλα τα μοντέλα κάθε εταιρείας.

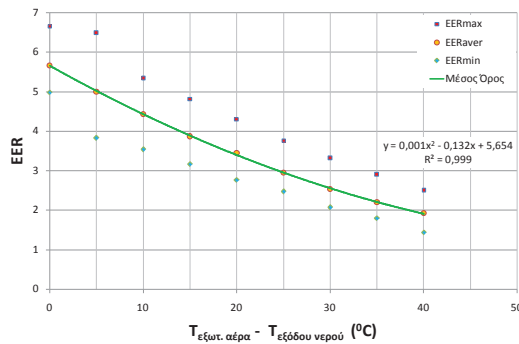


Εικόνα 7: Συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξόδου θερμού νερού και εξωτερικού αέρα (μέσες τιμές δειγμάτων)

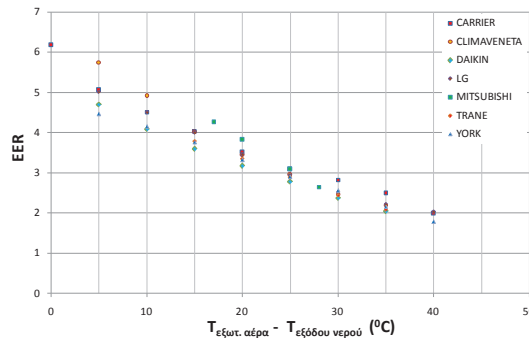
Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας EER συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας από όλο το δείγμα των ΑΘ, ενώ στην εικόνα 10 φαίνονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές του EER από τα μοντέλα της κάθε εταιρείας ξεχωριστά. Τα όρια της θερμοκρασιακής ΔT , όπως προκύπτουν από τα databooks των εταιρειών, είναι από 0K έως 70K. Το ΔT για ψύξη σε συνηθισμένες εφαρμογές των ΑΘ στην Ελλάδα κυμαίνεται συνήθως από 10K (π.χ. για εξωτερική θερμοκρασία αέρα 28°C και θερμοκρασία εξόδου νερού 18°C για δροσισμό σε εγκαταστάσεις ενδοδαπέδιας ψύξης) έως 35K (π.χ. για εξωτερική θερμοκρασία αέρα 42°C και θερμοκρασία εξόδου νερού από την ΑΘ 7°C).



Εικόνα 8: Μέσος συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξόδου θερμού νερού και εξωτερικού αέρα (για κάθε εταιρεία)



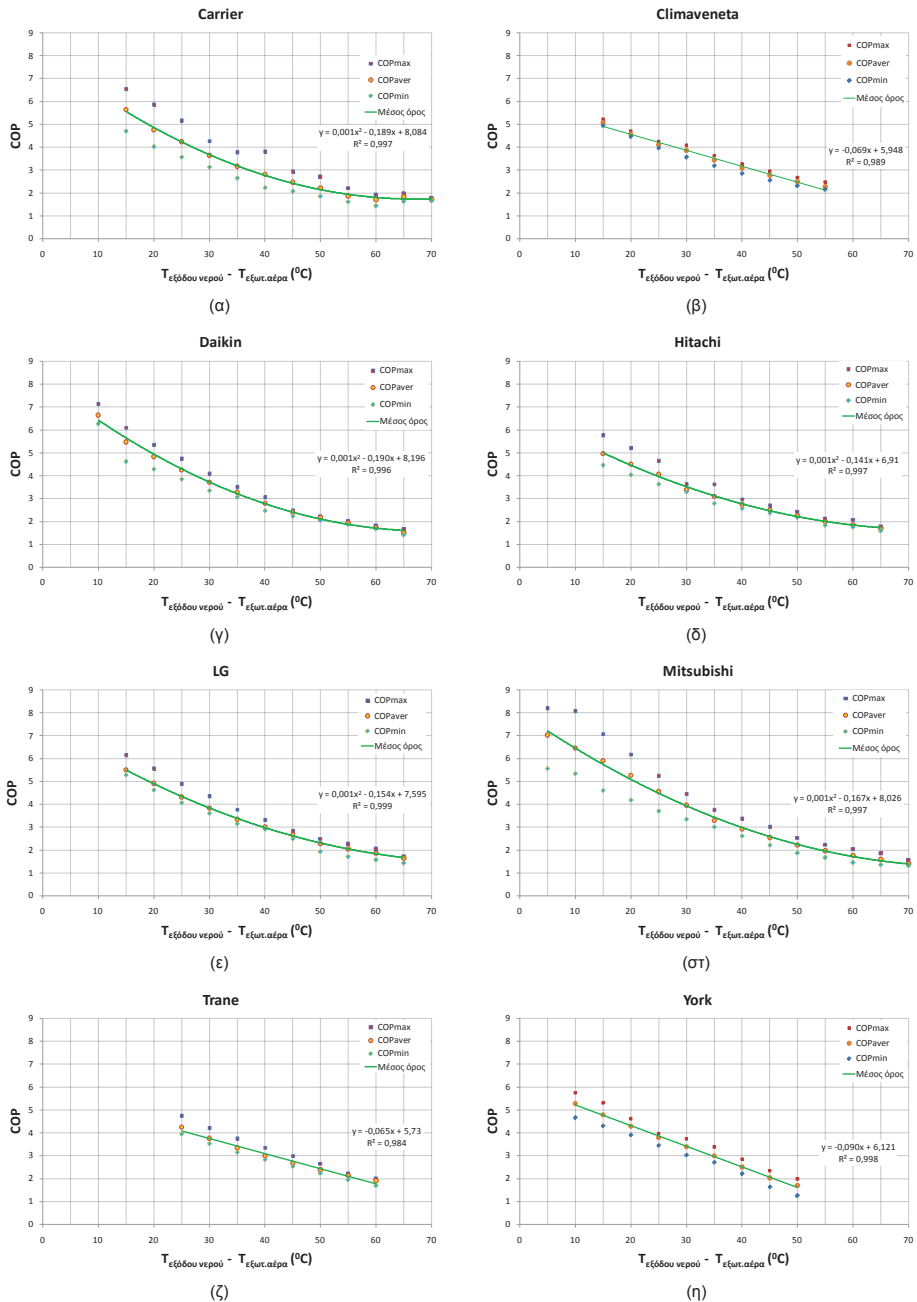
Εικόνα 9: Συντελεστής αποδοτικότητας EER σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα και εξόδου ψυχρού νερού (μέσες τιμές δείγματος)



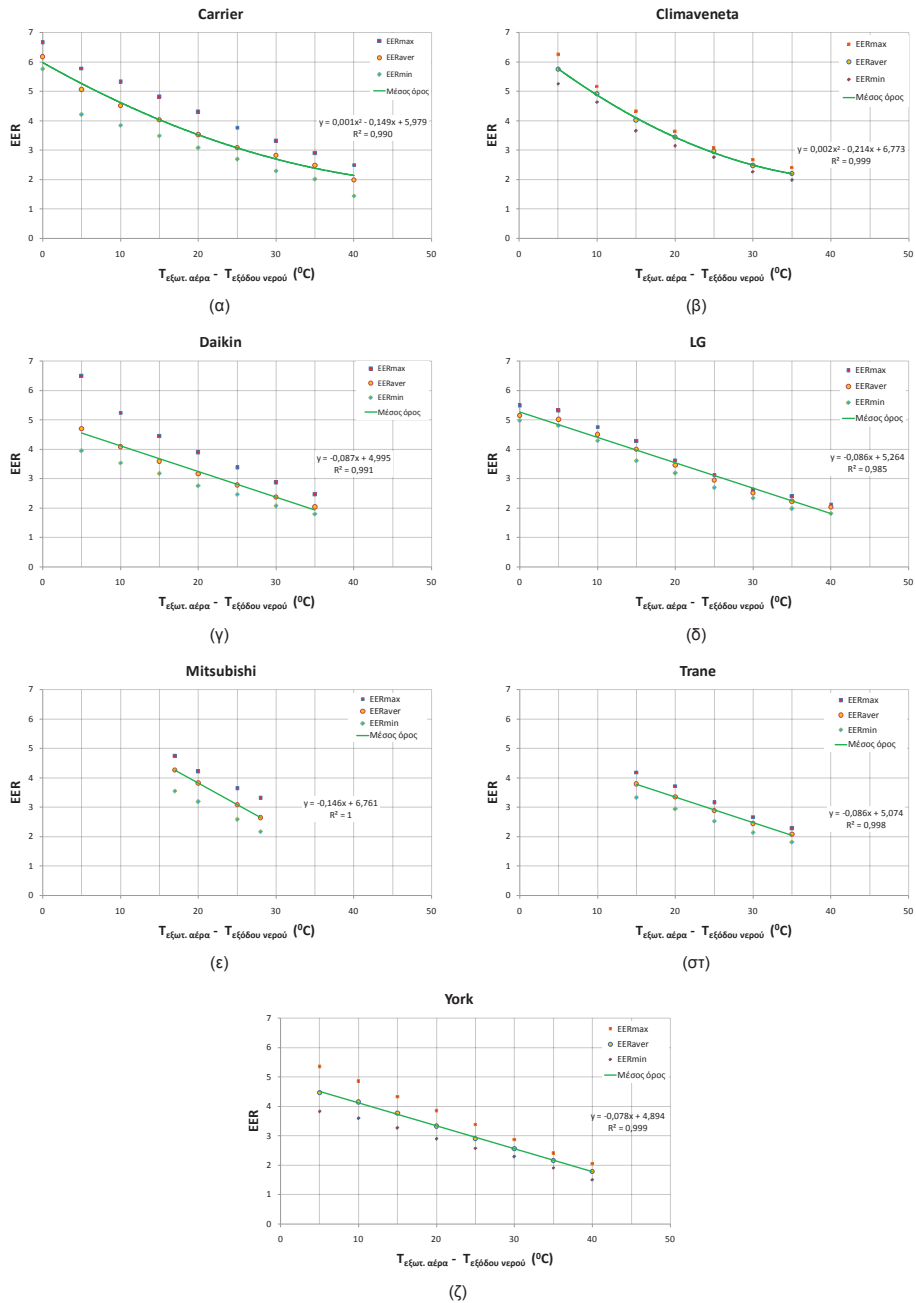
Εικόνα 10: Μέσος συντελεστής αποδοτικότητας EER σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα και εξόδου ψυχρού νερού (για κάθε εταιρεία)

Όσο διευρύνεται η διαφορά θερμοκρασίας, δηλαδή αυξάνει η θερμοκρασία περιβάλλοντος και μειώνεται η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα ψύξης, τόσο ελαττώνεται ο EER. Η μείωση της τιμής του EER είναι περίπου 1 ανά 10K. Το εύρος των ακραίων τιμών του EER ($EER_{\max} - EER_{\min}$) είναι περίπου 2 για $\Delta T=10K$ και μειώνεται περίπου στο 1.5 για $\Delta T=20+30K$, δηλαδή και στη λειτουργία ψύξης υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις αποδόσεις των διαφόρων μοντέλων για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Το εύρος αυτών των αποκλίσεων δεν φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 10 διότι οι τιμές που απεικονίζονται είναι μέσες τιμές των συντελεστών EER από όλα τα μοντέλα κάθε εταιρείας.

Αντίστοιχα διαγράμματα των συντελεστών αποδοτικότητας COP και EER σε σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα και θερμού ή ψυχρού νερού διαμορφώθηκαν και για κάθε μία εταιρεία ξεχωριστά, και παρουσιάζονται στις εικόνες 11 και 12 αντίστοιχα. Και στα διαγράμματα αυτά φαίνονται ο μέγιστος και ο ελάχιστος συντελεστής αποδοτικότητας σε κάθε θερμοκρασιακή διαφορά από όλο το δείγμα των μοντέλων κάθε εταιρείας, καθώς και ο μέσος συντελεστής αποδοτικότητας του δείγματος. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμεύσουν για την επιλογή μιας ΑΘ σε μία μελέτη διότι παρέχουν μια γρήγορη πληροφορία σύγκρισης ανάμεσα στις αποδόσεις των ΑΘ που προσφέρουν οι διάφορες εταιρείες. Σε κάθε διάγραμμα, είτε για λειτουργία θέρμανσης είτε για λειτουργία ψύξης, απεικονίζεται και η καμπύλη του μέσου COP ή EER καθώς και η συνάρτησή της. Οι συναρτήσεις αυτών των καμπύλων μπορούν να χρησιμεύσουν για συγκριτικές προσομοιώσεις της λειτουργίας ενός συστήματος θέρμανσης ή ψύξης με ΑΘ της κάθε εταιρείας, με τον υπολογισμό των εποχιακών βαθμών αποδοτικότητας των ΑΘ της κάθε εταιρείας.



Εικόνα 11: Συντελεστής αποδοτικότητας COP σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξόδου θερμού νερού και εξωτερικού αέρα (ανά εταιρεία)



Εικόνα 12: Συντελεστής αποδοτικότητας EER σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα και εξόδου ψυχρού νερού (ανά εταιρεία)

Σχετικά με τα διαγράμματα του COP (διαγράμματα 11-α έως 11-η), παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλες τις ΑΘ των εταιρειών του δείγματος, για κάθε αύξηση της ΔΤ κατά 5K η μείωση της μέσης τιμής του COP είναι περίπου 0.5. Επίσης για το εύρος θερμοκρασιακών διαφορών ΔΤ από 20K÷60K, οι οποίες όπως αναφέρθηκε εμφανίζονται συνήθως σε εφαρμογές θέρμανσης στην Ελλάδα, η τιμή του COP μειώνεται από το 5 στο 2 για όλες σχεδόν τις ΑΘ των εταιρειών του δείγματος. Και στα διαγράμματα του EER (διαγράμματα 12-α έως 12-ζ), παρατηρείται ότι για κάθε αύξηση της ΔΤ κατά 5K η μείωση της μέσης τιμής του EER είναι 0.5 κατά μέσο όρο (εκτός από το διάγραμμα 12-ε, στο οποίο η μεταβολή του EER είναι 0.8 ανά 5K). Επίσης για το εύρος θερμοκρασιακών διαφορών ΔΤ από 10K÷35K, οι οποίες όπως αναφέρθηκε εμφανίζονται συνήθως σε εφαρμογές ψύξης στην Ελλάδα, η τιμή του EER μειώνεται από το 4.5 στο 2.5 κατά μέσο όρο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια συγκριτική ανάλυση των συντελεστών αποδοτικότητας σε θέρμανση (COP) και ψύξη (EER) των ΑΘ αέρα-νερού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ελληνική αγορά από διάφορες εταιρείες κατασκευής ΑΘ κατά τα τελευταία 5 χρόνια. Η συγκριτική ανάλυση έγινε με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές των διαφόρων μοντέλων, που δίνονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κάθε εταιρείας. Εξετάστηκαν συσκευές με χαμηλή, μέση και υψηλή θερμική και ψυκτική ισχύ, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους κτιρίων, και κυρίως σε εφαρμογές θερμικής άνεσης. Η σύγκριση έγινε στις συνθήκες θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα και νερού κατά Eurovent (συνθήκες Eurovent LCP/A/CHP και Eurovent LCP/A/AC).

Διαπιστώθηκε μία συσχέτιση των συντελεστών αποδοτικότητας COP και EER με την αποδιδόμενη ισχύ, κυρίως σε περιοχές χαμηλής θερμικής και ψυκτικής ισχύος (<20kW) αλλά δεν είναι τόσο ξεκάθαρη δεδομένου ότι για κάποια μοντέλα είναι θετική και για κάποια άλλα μοντέλα αρνητική. Μετά από κάποια τιμή θερμικής ή ψυκτικής ισχύος, οι συντελεστές αποδοτικότητας είναι σταθεροί με μικρές διακυμάνσεις. Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και από άλλες μελέτες για αντλίες θερμότητας σε εφαρμογές γεωθερμίας [13, 17].

Η συσχέτιση των μέσων συντελεστών αποδοτικότητας του δείγματος σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας (ΔΤ) εξόδου νερού από την ΑΘ και εξωτερικού αέρα, δίνει μια καλύτερη απεικόνιση της συμπεριφοράς των ΑΘ τόσο συνολικά όσο και ανά εταιρεία. Από τη διακύμανση των τιμών των συντελεστών COP και EER στις διάφορες τιμές της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔΤ μπορούν να εξαχθούν και συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των ΑΘ που προσφέρει κάθε εταιρεία. Βέβαια, επειδή η ανάλυση στην παρούσα εργασία έγινε για κάποιες δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας, μόνο η λεπτομερής ενεργειακή ανάλυση με συγκεκριμένα μοντέλα και σε συνθήκες πραγματικού κλίματος μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επιλογή μιας ΑΘ σε μελέτες σκοπιμότητας και σχεδιασμού συστημάτων, διότι παρέχουν μια γρήγορη πληροφορία σύγκρισης ανάμεσα στις αποδόσεις των ΑΘ που προσφέρουν οι διάφορες εταιρείες. Επίσης μπορούν να χρησιμεύσουν για συγκριτικές προσομοιώσεις της λειτουργίας ενός συστήματος θέρμανσης ή ψύξης ανάμεσα σε ΑΘ διαφόρων εταιρειών, με τον υπολογισμό των εποχιακών βαθμών αποδοτικότητας και την εκτίμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, έχοντας δεδομένα τα κτιριακά στοιχεία και τα κλιματολογικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eurostat, June 2017, Energy balance sheets – Data 2015.
- [2] ODYSSEE-MURE, 2015, “Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors - An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases”, Report from the ODYSSEE-MURE project co-funded by the Intelligent Energy Europe programme of the European Union.
- [3] Carrier, <http://www.ahi-carrier.gr/el/products/carrier-commercial-systems/air-to-water-heat-pumps/>
- [4] Climaveneta Technical Bulletin, AWR_MTD2_XE_0011_0091_201211_EN, NECS_N_0202T_0612T_201211_EN, ELCADOC - Ver. 1.0.0.7

- [5] Daikin Altherma, ERHQ-BW1, EEDEN15-725 07/15, ERSQ-AY1
- [6] Hitachi, Yutaki M Series, TCGB0090 rev.0 - 12/2013
- [7] LG, Therma V, P/No. : MFL66101110
- [8] Mitsubishi, “Ecodan – Air-to-water heat pump systems”, Aug. 2015 M-P0655 SIZ1508<MEE>
- [9] Trane, “Reversible Air-to-water scroll heat pumps – model CXA 040-115”, “Flex Series heat pumps”, <https://www.trane.com/commercial/global/europe/en/products-systems/equipment/heat-pumps/air-to-water.html>
- [10] York, “Air-condensed cooling units and heat pumps YLCA / YLHA PLUS 5 to 27” Ref.: N-40314_EN 0912, “Air-condensed water chillers and heat pumps YLCA / YLHA” Ref.: N-40287_EN 0413.
- [11] Εφημερίς της Κυβερνήσεως, Ν4122/2013, ΦΕΚ 42/13-2-2013, Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις, άρθρο 2 παρ.22.
- [12] Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, Ιούλιος 2017, πίνακας Β1
- [13] Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A., 2012, “A review of domestic heat pumps”, Energy & Environmental Science, 5, 9291-9306
- [14] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Σύγκριση κόστους από διάφορες τεχνολογίες», Νοέμβριος 2016, http://www.lsbtp.mech.ntua.gr/el/th_cost_intercomparison
- [15] Martinopoulos G., Papakostas K.T., Papadopoulos A.M., 2016, “Comparative analysis of various heating systems for residential buildings in Mediterranean climate”, Energy and Buildings, 124, pp.79-87.
- [16] EN14511-3, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 3: Test methods.
- [17] Terzić, I., Šušteršič, V., Donović, K., 2017, “Comparative Analysis of Geothermal Heat Pumps”, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering (DEMI 2017), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ. ΜΙΑ ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΡΗΤΗΣ.

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης^{1*}, Κλαίρη Γεωργιλιά², Απόστολος Μιχόπουλος³,
Νικόλαος Ψαρράς⁴, Γιώργος Ζηδιανάκης¹, Δημήτρης Γ. Χρηστάκης¹,
Κωνσταντίνος Κονταξάκης¹, Σπύρος Κάνουρας⁵

^{1*} Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Κρήτης,

² Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Πανεπιστημίου Κρήτης,

³ Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο
Κύπρου

⁴ Aid Engineering Ltd

⁵ Δίοψις Συμβουλευτική Ε.Π.Ε.

e-mail: dkatsap@staff.teicrete.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το άρθρο αυτό παρουσιάζει τα βασικά σημεία της εκπονημένης μελέτης ενεργειακής αναβάθμισης του κτηρίου του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, η οποία συμπεριέλαβε μία εκτενή ομάδα ενεργητικών και παθητικών συστημάτων. Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν η κατάδειξη του βέλτιστου συνδυασμού συστημάτων και η αναλυτική διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και προσομοίωση λειτουργίας, ώστε το κτήριο να καταστεί «κτήριο σχεδόν μηδενικής ενέργειας» (nearly Zero Energy Building). Ανάμεσα στα προτεινόμενα παθητικά συστήματα περιλαμβάνονται η εφαρμογή πλήρους θερμικής μόνωσης κτηριακού κελύφους, η αντικατάσταση των υφιστάμενων ανοιγμάτων, η εφαρμογή πράσινου δώματος σε επιλεγμένο τμήμα του δώματος του κτηρίου, και για επιδεικτικούς λόγους και η βιοκλιματική παρέμβαση ανοιχτού χώρου έξωθεν του κτηρίου, με σκοπό την τοπική βελτίωση του μικροκλίματος και την επέκταση του εκθεσιακού χώρου του Μουσείου στους εξωτερικούς αυτού χώρους. Επιπλέον, αναφορικά με τα ενεργητικά συστήματα, μελετήθηκε η εγκατάσταση 4 μικρών ανεμογεννητριών παραγωγής του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού σταθμού σε τμήμα της στέγης του κτηρίου, η εγκατάσταση γεωθερμικού συστήματος ανοιχτού βρόγχου για τον κλιματισμό του κτηρίου, παρεμβάσεις εξοικονόμησης στον ηλεκτροφωτισμό και πίνακας αντιστάθμισης κατανάλωσης άεργου ισχύος. Με τις προτεινόμενες παρεμβάσεις επιτυγχάνονται ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας από 40% έως 93% για τις διαφορετικές κατηγορίες κατανάλωσης του κτηρίου. Συνολικά, η ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας μειώνεται από 273,65 kWh/m² σε 18,36 kWh/m², δηλαδή κατά 93,29%. Το κτήριο αναβαθμίζεται από την κατηγορία ενεργειακής απόδοσης Δ στην Α+, βάσει ΚΕΝΑΚ. Το συνολικό κόστος των προτεινόμενων παρεμβάσεων ανέρχεται στις 880,000€.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων, Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά, Αβαθής γεωθερμία, Βιοκλιματικά κτήρια

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του παρόντος άρθρου είναι να παρουσιάσει την επιμέρους και την αθροιστική συμβολή όλων των δυνατών παθητικών και ενεργητικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα κτήριο. Καθώς η δυνατότητα αυτή, της ολιστικής δηλαδή προσέγγισης, δεν είναι συχνά εφικτή, εφόσον εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, τη θέση εγκατάστασής του, τη διαθέσιμη χρηματοδότηση κλπ, ο τρόπος με τον οποίο τα διάφορα παθητικά και ενεργητικά συστήματα δρουν συλλογικά ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτήριο δεν έχει ευρέως μελετηθεί. Επιπλέον, για κάθε επιμέρους μελετώμενη τεχνολογία, το άρθρο παρουσιάζει μεθόδους διαστασιολόγησης, χωροθέτησης και ετήσιων ενεργειακών υπολογισμών, παρέχοντας έτσι μία ολοκληρωμένη ανάλυση μεθόδων και τεχνικών.

Το ανωτέρω περιγραφόμενο αντικείμενο προσεγγίζεται με την εφαρμογή των εξεταζόμενων συστημάτων στο κτήριο του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας του Πανεπιστημίου Κρήτης (ΜΦΙΚ). Η βασική πρόκληση του όλου εγχειρήματος ήταν η ενεργειακή αναβάθμιση του κτηρίου από την ενεργειακή κατηγορία Δ, στην οποία αξιολογείται σήμερα, στην ενεργειακή κατηγορία Α+. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται και εισάγονται μία σειρά μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης. Η μελέτη αποσκοπεί στη χρηματοδότηση του έργου από το Διασυνοριακό Πρόγραμμα «Ελλάδα – Κύπρος 2014 – 2020», με δεδομένη και την υψηλή επισκεψιμότητα του χώρου ιδιαίτερα από μαθητές και νέους επισκέπτες, γεγονός που θα εξασφαλίσει ισχυρή επιδεικτικότητα των προτεινόμενων μέτρων, με απώτερο στόχο την καλλιέργεια «ενεργειακής παιδείας».

2. ΤΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΡΗΤΗΣ

2.1. Γεωγραφική θέση, ιστορικό υπόβαθρο

Το κτήριο στο οποίο στεγάζεται η έκθεση του ΜΦΙΚ βρίσκεται επί της ακτογραμμής, εντός του αστικού ιστού του Ηρακλείου. Το κτήριο συνοδεύεται από σπουδαίο ιστορικό υπόβαθρο, καθώς αρχικά κατασκευάστηκε για να στεγάσει τον πρώτο θερμοηλεκτρικό σταθμό στο νησί, υπό την ιδιοκτησία της «Ηλεκτρικής Ηρακλείου». Η κατασκευή του κτηρίου ξεκίνησε το 1918 και ολοκληρώθηκε το 1925 (Εικόνα 1α). Η πόλη του Ηρακλείου ηλεκτροδοτήθηκε για πρώτη φορά την παραμονή των Χριστουγέννων του 1925. Το κτήριο φιλοξένησε το θερμοηλεκτρικό σταθμό μέχρι το 1967, οπότε μετεγκαταστάθηκε στο σημερινό σταθμό Λινοπεραμάτων, 10 km περίπου δυτικά του Ηρακλείου.

Στη συνέχεια το κτήριο χρησιμοποιήθηκε για να στεγάσει την κεντρική λαχαναγορά της πόλης, έως τα μέσα της δεκαετίας του '90, όταν αυτή μεταφέρθηκε σε νέα θέση έξω από την πόλη. Για περίπου μία δεκαετία το κτήριο παρέμεινε αναξιοποίητο, έως το 2005, όταν ο Δήμος Ηρακλείου το παραχώρησε στο Πανεπιστήμιο Κρήτης για τη στέγαση της έκθεσης του ΜΦΙΚ. Μετά από ριζική ανακαίνιση και επέκταση, το 2007 το κτήριο ήταν πλέον έτοιμο για να φιλοξενήσει τη μεγαλύτερη έκθεση φυσικής ιστορίας στην Ελλάδα και μία από τις μεγαλύτερες στη Μεσογειακή λεκάνη (Εικόνες 1β και 1γ).



Εικόνα 1α: Το ΜΦΙΚ το 1925.



Εικόνα 1β: Το ΜΦΙΚ τη δεκαετία του '90.



Εικόνα 1γ: Το ΜΦΙΚ το 2007.

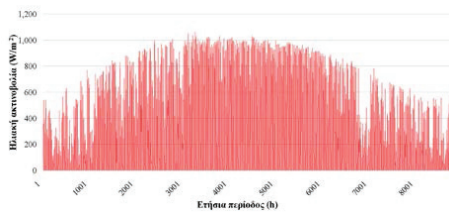
2.2. Κλιματικά δεδομένα – Δυναμικό Α.Π.Ε.

Οι κλιματικές συνθήκες στο ΜΦΙΚ είναι τυπικές Μεσογειακές. Ήπιοι χειμώνες, με θερμοκρασίες από 5 έως 17 °C, και δροσερά καλοκαίρια, με θερμοκρασίες και σχετική υγρασία που σπάνια υπερβαίνουν τους 30-32 °C και το 50% αντίστοιχα, εξαιτίας των βορειοδυτικών ανέμων που πνέουν στην περιοχή.

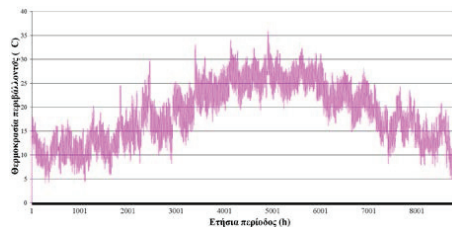
Η ετήσια διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια παρουσιάζεται στην Εικόνα 2α, με βάση μετρήσεις του Εργαστηρίου Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, σε απόσταση 4 km από τη θέση του ΜΦΙΚ. Με βάση την Εικόνα 2α, η ένταση

ηλιακής ακτινοβολίας τη θερινή περίοδο καταγράφεται υψηλότερη των 1.000 W/m^2 . Επίσης, η ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (solar irradiation), υπολογίζεται σε 1.780 kWh/m^2 . Η ετήσια χρονοσειρά θερμοκρασιών περιβάλλοντος για την περιοχή του Ηρακλείου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2β. Παρατηρείται ελάχιστη και μέγιστη ετήσια θερμοκρασία $4 \text{ }^\circ\text{C}$ και $35 \text{ }^\circ\text{C}$ αντίστοιχα.

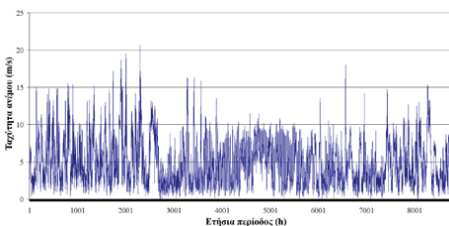
Τέλος, στην Εικόνα 3 δίνεται η ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου, με βάση μετρήσεις του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, με ιστό ύψους 40 m σε θέση που απέχει $3,9 \text{ km}$ από τη θέση του ΜΦΙΚ. Η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται στα $4,95 \text{ m/s}$, ενώ οι παράμετροι της κατανομής Weibull υπολογίζονται $C = 6,43 \text{ m/s}$ και $k = 1,90$.



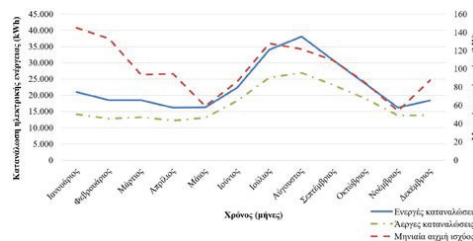
Εικόνα 2α: Ετήσια χρονοσειρά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 2β: Ετήσια χρονοσειρά θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Εικόνα 3: Ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου.



Εικόνα 4: Ετήσια διακύμανση υφιστάμενης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο ΜΦΙΚ.

Οι ήπιες καιρικές συνθήκες, με το πλούσιο δυναμικό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), δημιουργούν ευνοϊκές προοπτικές για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στο ΜΦΙΚ. Παρόλα αυτά, όπως θα φανεί παρακάτω, η υφιστάμενη κατάσταση απέχει πολύ από τη βέλτιστη.

2.3. Υφιστάμενη κατανάλωση ενέργειας

Το νέο κτήριο του ΜΦΙΚ καλύπτει συνολική επιφάνεια $5.750,6 \text{ m}^2$ σε έξι επίπεδα (δύο υπόγεια, ισόγειο, $1^{\text{ο}}$, $2^{\text{ο}}$ και $3^{\text{ο}}$ όροφος). Η επιφάνεια των κλιματιζόμενων χώρων είναι $5.083,6 \text{ m}^2$.

Στο κτήριο καταναλώνεται μόνο ηλεκτρική ενέργεια. Στην Εικόνα 4 αναλύεται η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, με βάση μετρήσεις του 2015. Η ετήσια ενεργός κατανάλωση υπολογίζεται στις 273.787 kWh , ενώ η ετήσια άεργος κατανάλωση υπολογίζεται στις 205.904 kWh . Η ανηγμένη συνολική (ενεργός και άεργος) κατανάλωση ηλεκτρικής και πρωτογενούς ενέργειας ως προς την επιφάνεια των κλιματιζόμενων χώρων του κτηρίου υπολογίζονται αντίστοιχα $94,36 \text{ kWh/m}^2$ και $273,65 \text{ kWh/m}^2$. Το κτήριο κατατάσσεται στην ενεργειακή κατηγορία Δ, βάσει Κ.ΕΝ.Α.Κ. [1].

Με βάση την Εικόνα 4, οι καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας ελαχιστοποιούνται το φθινόπωρο και την άνοιξη, ενώ μεγιστοποιούνται το χειμώνα και το καλοκαίρι. Συνεπώς, σημαντικό ποσοστό της κατανάλωσης οφείλεται στον κλιματισμό του κτηρίου, μέσω του κεντρικού συστήματος κλιματισμού VAV. Σημαντικό επίσης είναι το μερίδιο στην κατανάλωση του φωτισμού του κτηρίου και των εκθεμάτων, ενώ μικρότερη είναι η συμβολή των λοιπών καταναλώσεων (ανελκυστήρες, αντλίες συστήματος ύδρευσης, υπολογιστές κλπ).

Παρατηρείται επίσης υψηλή κατανάλωση άεργου ισχύος. Ο μέσος μηνιαίος συντελεστής ισχύος υπολογίζεται, με βάση τις μετρήσεις του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας, από $0,762$ έως $0,829$, με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται το φθινόπωρο και την άνοιξη, λόγω των χαμηλών φορτίων κλιματισμού που προκαλούν πιθανότατα συχνές επανεκκινήσεις του συστήματος κλιματισμού. Με

δεδομένο ότι οι ανωτέρω τιμές είναι μέσες, περιλαμβάνοντας φορτία που δεν προκαλούν κατανάλωση έργου ισχύος, οι πραγματικοί συντελεστές ισχύος αναμένεται να είναι ακόμα χαμηλότεροι.

Με βάση τα ανωτέρω, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις θα πρέπει να περιλαμβάνουν:

- παθητικά συστήματα, με στόχο τη μείωση των φορτίων κλιματισμού
- την αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος κλιματισμού, με στόχο υψηλότερα Coefficient of Performance (COP) και Energy Efficiency Ratio (EER)
- την αντιστάθμιση κατανάλωσης έργου ισχύος
- παρεμβάσεις στο φωτισμό του κτηρίου, με στόχο τη μείωση της σχετικής κατανάλωσης
- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ (π.χ. μικρές ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά).

3. ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1. Υφιστάμενη κατάσταση κτηριακού κελύφους

Το κτήριο του ΜΦΙΚ είναι μία σύνθετη κατασκευή. Αποτελείται από 6 επίπεδα, 9 διαφορετικές τοιχοποιίες και 2 διαφορετικούς τύπους στέγης – δώματος (Πίνακας 1). Με βάση τη συνθετικότητα αυτή του κτηρίου, ο ακριβής υπολογισμός των φορτίων κλιματισμού εκτελέστηκε με το λογισμικό TRNSYS.

Κατά την πρόσφατη ανακαίνιση του κτηρίου δεν δόθηκε η δέουσα προσοχή στην ενεργειακή απόδοσή του. Η θερμική μόνωση απουσιάζει, ή λόγω κακοτεχνιών πρακτικά δεν αποδίδει, σε όλες τις νέες επιφάνειες του κτηρίου. Ευτυχώς, το παλαιό κτήριο αποτελείται από λιθοδομή, πάχους 0,5 m, εμφανίζοντας θερμική συμπεριφορά με σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας, της τάξης του 1,5 W/(m²·K). Στις οροφές επίσης, λόγω κακής στεγανοποίησης, έχει διεισδύσει υγρασία και έχει καταστρέψει την υφιστάμενη μόνωση. Λόγω της απορρόφησης νερού από τη μόνωση, παρατηρούνται σταγόνες νερού στο έδαφος του εσωτερικού χώρου του κτηρίου έως και 2 εβδομάδες μετά την τελευταία βροχόπτωση.

Τέλος, για λόγους αισθητικούς και «κατασκευαστικής» συνέχειας με το παλαιό κτήριο, επιλέχτηκε χάλυβας για τα πλαίσια των ανοιγμάτων. Η γεινίαση όμως του κτηρίου με τη θάλασσα προκάλεσε πλήρη διάβρωση των πλαισίων στα περισσότερα ανοίγματα, αυξάνοντας τα φορτία λόγω αερισμού. Ο αυξημένος αερισμός του κτηρίου δεν συνάδει επίσης με τις προδιαγεγραμμένες συνθήκες εσωτερικού χώρου του κτηρίου, όπως αυτές διαμορφώνονται βάσει των απαιτήσεων διατήρησης των εκθεμάτων.

3.2. Προτεινόμενα παθητικά συστήματα

Με βάση τα ανωτέρω, προκύπτει η ανάγκη θερμικής μόνωσης 1.503,67 m² συνολικής επιφάνειας κατακόρυφης τοιχοποιίας και 1.539,64 m² συνολικής επιφάνειας οροφής. Προς ελαχιστοποίηση των οχλήσεων στους εσωτερικούς χώρους, επιλέγεται η εγκατάσταση εξωτερικής θερμομόνωσης τοιχοποιίας [2-6]. Ως μονωτικό υλικό προτείνεται διογκωμένη πολυστερίνη, πάχους 6cm και θερμικής αγωγιμότητας 0,035 W/m·K. Αναφορικά με τη μόνωση οροφής, καταρχήν θα εντοπιστούν τα σημεία ελαττωματικής υγρομόνωσης και θα στεγανοποιηθούν τοπικά. Στη συνέχεια, λόγω της εγκατάστασης φύλλων χαλκού εξωτερικά στην κυρίως στέγη του κτηρίου για αισθητικούς λόγους (Εικόνα 1γ), τα οποία είναι δύσκολο και ασύμφορο να αφαιρεθούν, η μόνωση θα γίνει εσωτερικά κάτω της στέγης, επίσης με διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 6cm. Για αισθητικούς λόγους θα τοποθετηθεί ψευδοροφή κάτω από τη μόνωση στέγης. Στα λοιπά δώματα του κτηρίου, η μόνωση θα γίνει εξωτερικά.

Επίσης, σε ένα συγκεκριμένο αυτοτελές δώμα, το οποίο ανήκει στις επεκτάσεις του κτηρίου, θα εγκατασταθεί φυτεμένο δώμα ημι-εντατικού τύπου, καθώς ο τύπος αυτός φύτευσης μπορεί να υποστηρίξει βλάστηση ύψους 20 – 50 cm, χωρίς να προσθέτει σημαντικό στατικό φορτίο στο φέροντα οργανισμό του κτηρίου, ενώ επίσης οι απαιτήσεις του σε συντήρηση και άρδευση είναι περιορισμένες.

Τέλος, θα χρειαστεί να αντικατασταθούν όλα τα ανοίγματα του κτηρίου, στο σύνολό τους 186, 39 πόρτες και 147 παράθυρα, συνολικής επιφάνειας 718,61 m². Τα νέα ανοίγματα θα είναι συνθετικού πλαισίου, με διπλό υαλοπίνακα πάχους 6mm και ενδιάμεσο πάχος 16 mm, πληρωμένο με αργό, με συνολική θερμοπερατότητα 1,4 W/m²K και συντελεστή ηλιακών κερδών 0,50. Οι διαφανείς επιφάνειες στις νότιες και δυτικές όψεις το κτηρίου προτείνεται να επικαλυφθούν με ανακλαστική στρώση, με στόχο την ελαχιστοποίηση των θερμικών κερδών τη θερινή περίοδο, με βάση και το δεδομένο, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη είναι υψηλότερη κατά 30% περίπου από την αντίστοιχη για θέρμανση.

Στόχος για όλες τις προτεινόμενες μονώσεις είναι η επίτευξη συνολικών συντελεστών θερμοπερατότητας μικρότερων του $0,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για την κατακόρυφη τοιχοποιία, $0,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για τις οροφές και $2,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για τις διαφανείς επιφάνειες.

Τονίζεται επίσης ότι δεν προτείνεται καμία παθητική παρέμβαση εξωτερικά του κτηρίου που μπορεί να αλλοιώσει την όψη του, όπως π.χ. πρόβολοι σκίασης κλπ, λόγω του χαρακτηρισμού του κτηρίου ως διατηρητέου και της επίβλεψής του από την Εφορεία Νεωτέρων Μνημείων.

3.3. Βιοκλιματικές παρεμβάσεις ανοιχτού χώρου

Στην Εικόνα 5α παρουσιάζεται δορυφορική κάτοψη του κτηρίου, όπου φαίνεται ότι ο κύριος άξονας του κτηρίου έχει τη διεύθυνση ανατολής – δύσης. Ο προσανατολισμός του κτηρίου, σε συνδυασμό με το ύψος και τον όγκο του, δημιουργεί μία εκτεταμένη υπήνεμη περιοχή στη νότια όψη του, κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, κατά την οποία η διεύθυνση πνοής του ανέμου είναι σχεδόν μόνιμα βορειοδυτική. Οι συνθήκες άπνοιας στη νότια όψη του κτηρίου, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοχωρητικότητα των περιβαλλουσών επιφανειών (άσφαλτος και σκυρόδεμα), συμβάλουν τελικά στη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης αισθητής θερμότητας στην περιοχή και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος τοπικά.

Στην ίδια περιοχή, μεταξύ του πεζοδρομίου και της νότιας τοιχοποιίας του κτηρίου, διαμορφώνεται αύλιος χώρος, στρωμένος σήμερα με τσιμεντόλιθους (Εικόνα 5β). Οι διαστάσεις του χώρου αυτού είναι $43,6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, δίνοντας συνολική επιφάνεια $174,4 \text{ m}^2$. Η μετατροπή του χώρου σε φυτεμένη περιοχή είναι εύκολη και αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας λόγω των ηλιακών κερδών, εις βάρος της αισθητής και, τελικά, στη βελτίωση του μικροκλίματος [7-10]. Επιπρόσθετα, με τη φύτευση του χώρου αυτού επιδιώκεται η αισθητική αναβάθμιση της νότιας όψης του κτηρίου και η επέκταση του εκθεσιακού χώρου του Μουσείου εκτός του κτηρίου, καθώς θα επιλεγούν προς φύτευση ενδημικά είδη χλωρίδας της Κρήτης.



Εικόνα 5α: Δορυφορική κάτοψη κτηρίου ΜΦΙΚ.



Εικόνα 5β: Χώρος προς φύτευση στη νότια όψη.

3.4. Φορτία κλιματισμού

Τα φορτία κλιματισμού υπολογίστηκαν με το λογισμικό TRNSYS με τις εξής βασικές παραδοχές υπολογισμού:

- οι θερμοπερατότητες υπολογίστηκαν αναλυτικά για όλα τα δομικά στοιχεία πριν και μετά τις παθητικές παρεμβάσεις και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1
- οι συντελεστές ηλιακών κερδών για τα ανοίγματα θεωρήθηκαν ίσοι με 0,589
- οι συντελεστές θερμικής μετάβασης h_i και h_o εσωτερικών και εξωτερικών χώρων λήφθηκαν ίσοι με:
 - $h_i = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ και $h_o = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για άνεμο ταχύτητας 5 m/s πάνω από οριζόντιες επιφάνειες
 - $h_i = 7,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ και $h_o = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για άνεμο ταχύτητας 5 m/s έξω από κατακόρυφες επιφάνειες
- ο συντελεστής αερισμού θεωρήθηκε ίσος με 3 για τα παλαιά ανοίγματα και 1 για τα νέα
- τα κλιματικά δεδομένα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.2
- συνθήκες θερμικής άνεσης: $22 \text{ }^\circ\text{C}$ το χειμώνα και $26 \text{ }^\circ\text{C}$ το καλοκαίρι, σχετική υγρασία 50%
- απαιτήσεις αερισμού, φορτία ενοίκων και συσκευών, βάσει Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2014 [11]
- το ημερήσιο πρόγραμμα λειτουργίας του Μουσείου που παραχωρήθηκε από τους υπεύθυνους.

Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές υπολογίζονται τα φορτία κλιματισμού πριν και μετά τις προτεινόμενες παθητικές παρεμβάσεις. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω.

3.4.1. Υφιστάμενη κατάσταση

Οι απαιτήσεις τελικής θερμικής ενέργειας για θέρμανση και ψύξη υπολογίστηκαν αντίστοιχα 193,4 MWh και 300,2 MWh. Η ειδική ετήσια κατανάλωση τελικής θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κλιματιζόμενων χώρων υπολογίζεται 38,05 kWh/m² για θέρμανση και 59,04 kWh/m² για ψύξη. Η συνολική ετήσια ειδική ενεργειακή απαίτηση θερμικής ενέργειας ισούται με 97,09 kWh/m².

<i>Πίνακας 1: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά δομικών στοιχείων κτηριακού κελύφους και συντελεστές θερμοπερατότητας πριν και μετά τις παθητικές παρεμβάσεις.</i>			
Α/Α	Περιγραφή	Συντελεστές θερμοπερατότητας (W/m ² ·K)	
		Υφιστάμενη κατάσταση	Μετά τις παρεμβάσεις
1	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm με επίχρισμα μόνο εσωτερικά	2,925	0,579
2	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm με γυψοσανίδα εσωτερικά	2,192	0,543
3	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm με πέτρα 30 cm και επίχρισμα εσωτερικά	1,456	0,557
4	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm με επίχρισμα μέσα - έξω	2,707	0,570
5	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm χωρίς επίχρισμα	3,180	0,589
6	Πέτρα με επίχρισμα μέσα – έξω	1,754	0,596
7	Οπλισμένο σκυρόδεμα 25 cm με επένδυση πωρόλιθου σε απόσταση 4 cm από τον τοίχο	1,934	0,526
8	Συνθετική τοιχοποιία	0,895	0,513
9	Μονός υαλοπίνακας	3,500	1,800
10	Ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα)	4,500	1,500
11	Στέγη	4,200	0,525
12	Δώμα	3,500	0,467

3.4.2. Μετά τις παθητικές παρεμβάσεις

Η ετήσια απαίτηση τελικής θερμικής ενέργειας για θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα υπολογίστηκαν 68,1 MWh και 121,7 MWh. Οι ετήσιες ειδικές ενεργειακές απαιτήσεις τελικής θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κλιματιζόμενων χώρων υπολογίζονται 13,40 kWh/m² για θέρμανση και 23,93 kWh/m² για ψύξη. Η συνολική ετήσια ειδική απαίτηση τελικής θερμικής ενέργειας υπολογίζεται 37,34 kWh/m².

Η ετήσια ποσοστιαία μείωση φορτίων θέρμανσης και ψύξης υπολογίζεται αντίστοιχα ίση με 67,77% και 59,46%. Η ποσοστιαία μείωση της ετήσιας συνολικής τελικής θερμικής ενέργειας ισούται με 61,54%.

Τα ανωτέρω ποσοστά μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας μέσω παθητικών συστημάτων. Τα υψηλότερα ποσοστά μείωσης φορτίων θέρμανσης, έναντι φορτίων ψύξης, είναι λογικά εξαιτίας του ότι:

- Ένα σημαντικό ποσοστό φορτίων ψύξης προέρχεται από εσωτερικές πηγές (ένοικοι, συσκευές), συνεπώς δεν επηρεάζονται από τις παρεμβάσεις στο κτηριακό κέλυφος.
- Η κακή συναρμογή των υφιστάμενων ανοιγμάτων συντελεί στο φυσικό αερισμό του κτηρίου το καλοκαίρι και στη μείωση των φορτίων ψύξης, ενώ το χειμώνα συντελεί στην αύξηση των φορτίων θέρμανσης. Με τα νέα ανοίγματα, ο φυσικός αερισμός του κτηρίου περιορίζεται, κάτι που επίσης επιβάλλεται για λόγους διατήρησης των εσωτερικών συνθηκών του κτηρίου βάσει των προδιαγραφών διατήρησης των εκθεμάτων. Παράλληλα περιορίζεται ο φυσικός αερισμός του κτηρίου, γεγονός που οδηγεί σε μείωση των φορτίων θέρμανσης και αύξηση των φορτίων ψύξης.

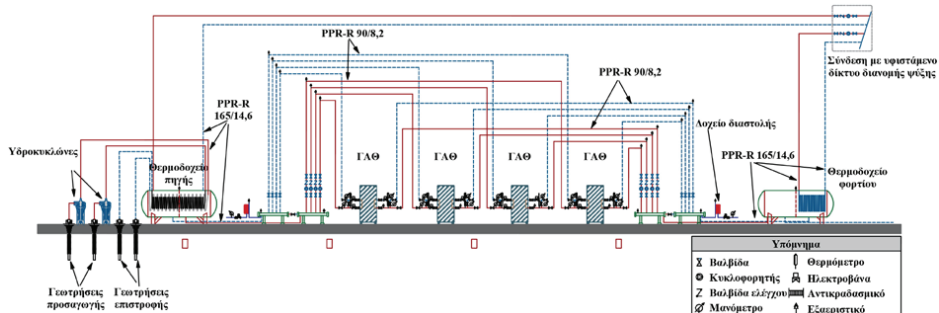
4. ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

4.1. Ενεργητικό σύστημα κλιματισμού

Με δεδομένη την ετήσια τελική απαίτηση θερμικής ενέργειας για θέρμανση και για ψύξη, όπως παρουσιάστηκε ανωτέρω, υποθέτοντας μέσες τιμές για COP και EER 2,7 και 2,5 αντίστοιχα [11] για το υφιστάμενο σύστημα VAV, υπολογίζονται οι αντίστοιχες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας για τη θέρμανση ίση με 71.632 kWh και για την ψύξη ίση με 120.062 kWh. Η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τον κλιματισμό του κτηρίου υπολογίζεται 191.694 kWh, η οποία αντιστοιχεί στο 70,02% της συνολικής ετήσιας ενεργής απαίτησης ηλεκτρικής ενέργειας (273.787 kWh).

Η γεινίαση του κτηρίου με τη θάλασσα και οι υψηλές ανάγκες ψύξης αποτελούν ευνοϊκές παραμέτρους για την εισαγωγή ενός συστήματος γεωθερμίας ανοιχτού βρόγχου [12-15]. Η σχετικά υψηλή θερμοκρασία του θαλασσινού νερού το χειμώνα και η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία του το καλοκαίρι (γύρω στους 16 °C και 25 °C αντίστοιχα, βάσει μετρήσεων του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. [16]), οδηγεί στη μεταφορά θερμότητας από και προς το θαλασσινό νερό με υψηλότερο COP και EER μέσω της Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (ΓΑΘ), με τελικό αποτέλεσμα τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Το κατακόρυφο υδραυλικό διάγραμμα του γεωθερμικού συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Το θαλασσινό νερό αντλείται μέσω δύο γεωτρήσεων προσαγωγής, διέρχεται μέσω δύο υδροκυκλώνων, για το διαχωρισμό του από στερεά σωματίδια, και τελικά οδηγείται στο «θερμοδοχείο πηγής» (source heat tank) μέσω κλειστού κυκλώματος, για να διαθέσει ή να απορροφήσει θερμότητα κατά τη λειτουργία θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα. Το θαλασσινό νερό διατίθεται πίσω στον υπόγειο υδροφόρα, μέσω δύο γεωτρήσεων επιστροφής. Η απόσταση ανάμεσα στις γεωτρήσεις άντλησης και επιστροφής του θαλασσινού νερού θα είναι τουλάχιστον 50 m, για να αποφευχθεί η επιδραση της θερμοκρασίας του νερού επιστροφής στη θερμοκρασία του νερού άντλησης. Από το θερμοδοχείο πηγής το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στις ΓΑΘ, μέσω ενός δεύτερου κλειστού κυκλώματος, όπου διαθέτει ή απορροφάει θερμότητα μέσω εναλλάκτη θερμότητας από το τελικό εργαζόμενο μέσο, το οποίο μέσω ενός τρίτου κλειστού κυκλώματος, οδηγείται στο δίκτυο διάθεσης θέρμανσης ή ψύξης.



Εικόνα 6: Κατακόρυφο υδραυλικό διάγραμμα συστήματος γεωθερμίας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού των φορτίων κλιματισμού του κτηρίου μετά την εισαγωγή των προτεινόμενων παθητικών συστημάτων, το μέγιστο ετήσιο φορτίο θέρμανσης και ψύξης υπολογίζεται 291,3 kW και 215,5 kW αντίστοιχα. Με βάση τη διαθεσιμότητα των εμπορικών μοντέλων, επιλέγεται ΓΑΘ με ονομαστική παραγωγή τελικής θερμικής και ψυκτικής ισχύος 80 kW και 60 kW αντίστοιχα. Συνολικά θα απαιτηθεί η προμήθεια και εγκατάσταση τεσσάρων ΓΑΘ του ανωτέρω τύπου.

Το ψυκτικό μέσο θα είναι το R410A. Η λειτουργία του συστήματος θα είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και ελεγχόμενη μέσω κεντρικής μονάδας ελέγχου. Η παραγόμενη θέρμανση ή η ψύξη θα οδηγείται τελικά στους κλιματιζόμενους χώρους μέσω του υφιστάμενου δικτύου αεραγωγών.

4.2. Παρεμβάσεις στον ηλεκτροφωτισμό

Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις στον ηλεκτροφωτισμό του κτηρίου συνίστανται στην αντικατάσταση των ενεργοβόρων λαμπτήρων και στην εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης των φορτίων φωτισμού.

Συνολικά στο κτήριο υπάρχουν 1.136 λαμπτήρες εσωτερικού χώρου, με ονομαστική ισχύ 40,669 kW και 62 λαμπτήρες εξωτερικού χώρου με ισχύ 4,937 kW. Με βάση τα αποτελέσματα έρευνας αγοράς, οι ανωτέρω τιμές μπορούν να μειωθούν σε 28,113 kW για τους λαμπτήρες εσωτερικού χώρου και σε

3,458 kW για τους λαμπτήρες εξωτερικού χώρου (ποσοστά μείωσης 30,93% και 29,96% αντίστοιχα), με εγκατάσταση νέων λαμπτήρων τεχνολογίας LED, αντίστοιχης έντασης φωτισμού και όμοιων ποιοτικών χαρακτηριστικών, ειδικά αναφορικά με τους λαμπτήρες φωτισμού των εκθεμάτων.

Το κεντρικό σύστημα διαχείρισης φορτίων φωτισμού αποτελείται από:

- Κεντρική μονάδα ελέγχου, με θόνη αφής και πλήκτρα χειρισμού.
- Ενεργοποιητές φορτίων (διακοπτικό υλικό), ένας για κάθε επίπεδο, εκτός από το Υπόγειο -1 και το Υπόγειο -2, για τα οποία, λόγω της διαρρύθμισης εσωτερικών χώρων, προτείνονται αντίστοιχα τρεις και δύο ενεργοποιητές. Επίσης τέσσερις ενεργοποιητές για τα φωτιστικά εξωτερικού χώρου.
- Τροφοδοτικά παροχής ρεύματος, συνολικά τρία σε αριθμό, ένα για τα Υπόγειο -1 και -2, ένα για το Ισόγειο και τους Ορόφους 1 – 3 και ένα για τους εξωτερικούς χώρους.
- Είκοσι ανιχνευτές κίνησης κατάλληλα τοποθετημένους σε διάφορους χώρους του κτηρίου.
- Καλωδιώσεις BUS από σημείο σε σημείο χωρίς να κλείνει βρόγχος.

Το σύστημα θα έχει δυνατότητα αφής και σβέσης των κυκλωμάτων φωτισμού από τα αισθητήρια παρουσίας, τους διακόπτες, κεντρικά και απομακρυσμένα από την έξοδο IP της θόνης.

4.3. Αντιστάθμιση άεργου ισχύος

Σύμφωνα με τα στοιχεία κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του κτηρίου, όπως παραχωρήθηκαν από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, η ετήσια άεργη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στις 205.904,05 kWh και οφείλεται κυρίως στο σύστημα κλιματισμού.

Για τη μείωση της άεργης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας θα εγκατασταθεί πίνακας αντιστάθμισης άεργου ισχύος, ονομαστικής ισχύος 75 kVA_r. Ο ελεγκτής αντιστάθμισης θα είναι 6 βημάτων, από τα οποία χρησιμοποιούνται τα 5, ενώ το τελευταίο βήμα θα είναι εφεδρικό. Τα βήματα του πίνακα αντιστάθμισης θα είναι 5, 10, 20, 20, 20 kVA_r. Με το προτεινόμενο σύστημα, ο συνολικός μέσος μηνιαίος συντελεστής ισχύος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερος για κανένα μήνα του έτους από 0,99.

Ας σημειωθεί επίσης ότι λόγω της μείωσης της άεργου ισχύος και κατ' επέκταση της συνολικά μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο διανομής, επιτυγχάνεται περίπου μία εξοικονόμηση ενεργούς κατανάλωσης της τάξης του 5%, λόγω των χαμηλότερων απωλειών μεταφοράς δικτύου. Η εξοικονόμηση αυτή σαφώς εντοπίζεται εντός του δικτύου και πριν την καταμέτρηση της κατανάλωσης από τους μετρητές του κτηρίου. Συνεπώς από τη μείωση της άεργου ισχύος επωφελείται επιπρόσθετα ο διανομέας ισχύος και όχι ο τελικός καταναλωτής.

4.4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ

Πέραν των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, η ενεργειακή αναβάθμιση του κτηρίου του ΜΦΙΚ ολοκληρώνεται με την εγκατάσταση τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, θα εγκατασταθεί ένας φωτοβολταϊκός σταθμός ισχύος 10 kW σε αυτόνομο δώμα του κτηρίου και 4 μικρές ανεμογεννήτριες, ισχύος 5 kW έκαστη (συνολικά 20 kW), επίσης σε δύο διαφορετικά δώματα του κτηρίου, όπως καταδεικνύεται στις Εικόνες 5α και 5β. Το επιλεγμένο μοντέλο μικρής ανεμογεννήτριας σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Η ρύθμιση της παραγωγής ισχύος γίνεται με παθητικό τρόπο. Έως σήμερα έχουν εγκατασταθεί 3 τέτοιες ανεμογεννήτριες στην Κρήτη και στη Χίο.

Η εγκατάσταση κατά το δυνατόν μεγαλύτερης ισχύος τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, με στόχο την προσέγγιση κτηρίου σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, περιορίζεται από:

- Τον ιστορικό χαρακτήρα του κτηρίου, εξαιτίας του οποίου δεν είναι εφικτή η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στη νότια όψη του κτηρίου, η οποία είναι ορατή από τον αστικό ιστό της πόλης. Στο επιλεγμένο δώμα τα πλαίσια δεν είναι ορατά λόγω περιμετρικού στηθαίου.
- Επιπλέον, η θέση εγκατάστασης θα πρέπει να είναι εύκολα και με ασφάλεια προσβάσιμη, για τις εργασίες τακτικής συντήρησης και καθαρισμού.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις τεχνολογίες ΑΠΕ θα συμψηφίζεται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το κτήριο (λειτουργία net-metering).

5. ΕΞΟΙΚΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι υπολογισμοί εξοικονόμησης και παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ από τα ανωτέρω ενεργητικά συστήματα.

5.1. Εξοικονόμηση στον ηλεκτροφωτισμό

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες φωτισμού του ΜΦΙΚ υπολογίζεται με βάση την εγκατεστημένη ισχύ των λαμπτήρων φωτισμού και το ωράριο λειτουργίας του κτηρίου, το οποίο θα παραμείνει αμετάβλητο και μετά την υλοποίηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Με τις προτεινόμενες παρεμβάσεις επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας λόγω:

- Της μικρότερης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των νέων λαμπτήρων.
- Της αυτοματοποιημένης λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων, μέσω κεντρικού συστήματος διαχείρισης, η οποία βάσει στατιστικών και εμπειρικών δεδομένων, οδηγεί σε επιπλέον ποσοστά εξοικονόμησης της τάξης του 20% [17-20]. Η επιπλέον αυτή εξοικονόμηση επιτυγχάνεται με τη μείωση της έντασης φωτισμού σε περιπτώσεις διάθεσης φυσικού φωτισμού, ή με τη σβέση των φωτιστικών σε περιπτώσεις απουσίας επισκεπτών. Καθώς οι διεργασίες αυτές είναι δύσκολο να προσομοιωθούν, υιοθετείται η ανωτέρω εκτίμηση για την αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας.

Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το φωτισμό του κτηρίου, πριν και μετά τις παρεμβάσεις, υπολογίζεται αντίστοιχα 67.735 kWh και 39.685 kWh. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας προκύπτει 28.050 kWh, που αντιστοιχεί στο 41% της υφιστάμενης κατανάλωσης.

5.2. Πραγματικοί συντελεστές ισχύος

Οι συντελεστές ισχύος όπως υπολογίζονται από τις μετρήσεις του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι οι πραγματικοί, καθώς αντιστοιχούν σε μέσες τιμές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται επίσης και φορτία που δεν καταναλώνουν άεργο ισχύ (π.χ. φωτισμός). Οι πραγματικοί συντελεστές ισχύος θα πρέπει να αναμένονται μικρότεροι από τους μέσους. Με τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτιστικά σώματα, στην οποία αντιστοιχεί αμελητέα κατανάλωση άεργου ισχύος, είναι πλέον εφικτή μία πιο ακριβής προσέγγιση των πραγματικών συντελεστών ισχύος, ως εξής:

- καταγράφονται οι μηνιαίες ενεργές και άεργες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας, όπως διατίθενται από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας
- για κάθε μήνα αφαιρείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτιστικά σώματα από τη συνολική υφιστάμενη ενεργή κατανάλωση και υπολογίζεται έτσι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από επαγωγικά φορτία
- οι πραγματικοί μηνιαίοι συντελεστές ισχύος υπολογίζονται με βάση την υφιστάμενη κατανάλωση άεργου και την ενεργή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα επαγωγικά φορτία.

Τα αποτελέσματα από τους ανωτέρω υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Ο υπολογισμός των πραγματικών συντελεστών ισχύος απαιτείται για μία πιο ακριβή προσέγγιση της αναμενόμενης εξοικονόμησης άεργου ισχύος.

Πίνακας 2: Υπολογισμός πραγματικών συντελεστών ισχύος.												
Μήνας	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
cosφ	0,757	0,747	0,729	0,660	0,637	0,650	0,729	0,756	0,718	0,683	0,606	0,703

5.3. Εξοικονόμηση στο σύστημα κλιματισμού

Η εξοικονόμηση ενέργειας στο σύστημα κλιματισμού επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

- Λόγω της μείωσης στα φορτία κλιματισμού (βλέπε ενότητα 3.4)
- Λόγω της αύξησης των COP και EER μέσω της εγκατάστασης συστήματος γεωθερμίας
- Λόγω της αντιστάθμισης άεργου ισχύος.

Σχετικά με τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις προτεινόμενες ΓΑΘ, για την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ετήσια χρονοσειρά θερμοκρασίας θαλασσινού νερού, η οποία παραχωρήθηκε από τη βάση δεδομένων "Ποσειδώνας" του ΕΛΚΕΘΕ, από το σταθμό στη θέση με συντεταγμένες 35° 46'59.4"Β, 24° 54'52.8"Α, 28,1 ναυτικά μίλια (52km) βόρεια του Ηρακλείου [21]. Η διακύμανση της θερμοκρασίας θαλασσινού νερού από τον ανωτέρω σταθμό μετρήθηκε από 16,2 °C το Φεβρουάριο σε 24,8 °C το Σεπτέμβριο, σε βάθος 50 m. Επίσης, υπολογίστηκε η διακύμανση των συντελεστών EER και COP του μοντέλου ΓΑΘ που θα χρησιμοποιηθεί, συναρτήσει της θερμοκρασίας του εισερχόμενου θαλασσινού νερού και της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τη ΓΑΘ, η οποία τέθηκε ίση με 7 °C και 45 °C για

ψύξη και θέρμανση αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα υπολογισμού παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Ο νέος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης, μετά την αντιστάθμιση, θεωρήθηκε ίσος με 0,99.

Πίνακας 3: Υπολογισμός κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα κλιματισμού πριν και μετά τις παρεμβάσεις.								
	Υφιστάμενη κατάσταση				Μετά τις παθητικές και ενεργητικές παρεμβάσεις			
Μήνας	Θέρμ/ση – ενεργός (kWh)	Ψύξη – ενεργός (kWh)	Θέρμ/ση – άεργος (kWh)	Ψύξη – άεργος (kWh)	Θέρμ/ση – ενεργός (kWh)	Ψύξη – ενεργός (kWh)	Θέρμ/ση – άεργος (kWh)	Ψύξη – άεργος (kWh)
	22.999	0	19.858	0	4.182	0	596	0
1	17.373	0	15.452	0	3.134	0	446	0
2	8.761	0	8.223	0	1.508	0	215	0
3	274	598	311	680	6	0	1	0
4	0	8.582	0	10.389	0	1.044	0	149
5	0	26.457	0	30.968	0	3.610	0	514
6	0	37.474	0	35.225	0	5.507	0	785
7	0	32.714	0	28.323	0	5.142	0	733
8	0	12.870	0	12.482	0	2.441	0	348
9	159	1.368	170	1.462	0	427	0	61
10	4.543	0	5.961	0	235	0	33	0
11	17.524	0	17.729	0	2.725	0	388	0
12	71.633	120.062	67.704	119.529	11.789	18.171	1.680	2.589
Ετήσια σύνολα	191.695		187.234		29.961		4.269	
	378.929				34.230			

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 3:

- η ενεργός κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τον κλιματισμό του κτηρίου μειώνεται κατά 84,37%
- η άεργος κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τον κλιματισμό του κτηρίου μειώνεται κατά 90,97%.

5.4. Εξοικονόμηση άεργης κατανάλωσης για τα λοιπά φορτία

Πέραν από το φωτισμό και το σύστημα κλιματισμού, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις λοιπές συσκευές και υποδομές του κτηρίου (υπολογιστές ανελκυστήρες, αντλίες ύδρευσης κλπ) προκύπτουν ως η διαφορά των καταναλώσεων φωτισμού και κλιματισμού από τη συνολική κατανάλωση. Για τις καταναλώσεις αυτές δεν προτείνεται κάποιο ιδιαίτερο μέτρο εξοικονόμησης. Ωστόσο, η βελτίωση του συντελεστή ισχύος θα οδηγήσει σε αντίστοιχη μείωση άεργης κατανάλωσης.

5.5. Παραγωγή από ΑΠΕ

Ο υπολογισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις μικρές ανεμογεννήτριες και το φωτοβολταϊκό σταθμό εκτελέστηκε με βάση τις ετήσιες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου (Εικόνα 3), ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 2α) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Εικόνα 2β), καθώς και την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας [21, 22]. Ο υπολογισμός εκτελέστηκε σε ετήσια βάση με μέσα ωριαία χρονικά βήματα, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις απώλειες παραγωγής. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μικρές ανεμογεννήτριες και το φωτοβολταϊκό σταθμό τελικά υπολογίζεται ίση με 43.499 kWh και 14.626 kWh αντίστοιχα, παραγωγές που αντιστοιχούν σε ετήσιους συντελεστές απασχόλησης 24,83% και 16,70% αντίστοιχα.

5.6. Σύνοψη υπολογισμών εξοικονόμησης

Η υφιστάμενη ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναλύεται στον πίνακα 4, μαζί με την ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, η οποία υπολογίζεται υιοθετώντας έναν συντελεστή μετατροπής, βάσει Κ.ΕΝ.Α.Κ., ίσο με 2,90 [1]. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, ως προς τη συνολική επιφάνεια κλιματιζόμενων χώρων (5.083,60 m²).

Πίνακας 4: Ανάλυση υφιστάμενης κατανάλωσης ενέργειας.

	Ενεργός κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Άεργος κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh)	Ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh/m ²)
Θέρμανση	71.633	67.704	404.077	79,49
Ψύξη	120.062	119.529	694.816	136,68
Φωτισμός	67.735	0.00	196.431	38,64
Λοιπές καταναλώσεις	14.358	18.670	95.781	18,84
Συνολική κατανάλωση	273.787	205.904	1.391.105	273,65

Ομοίως, στον πίνακα 5 αναλύεται η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής και πρωτογενούς ενέργειας στο ΜΦΙΚ μετά τις παρεμβάσεις. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις προτεινόμενες τεχνολογίες ΑΠΕ, η οποία συμψηφίζεται με την κατανάλωση ενέργειας.

Η νέα ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας υπολογίζεται 18,36 kWh/m². Σύμφωνα με την εκπονηθείσα ενεργειακή επιθεώρηση, η ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για το κτήριο αναφοράς υπολογίστηκε 157,4 kWh/m². Ο λόγος των δύο αυτών ειδικών καταναλώσεων ισούται με 0,12, κάτι που συνεπάγεται την κατάταξη του κτηρίου στην ενεργειακή κατηγορία Α+, μετά την υλοποίηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων, σύμφωνα με τον Κ.ΕΝ.Α.Κ. [1]. Στη Εικόνα 7 παρέχεται σύνοψη των αποτελεσμάτων εξοικονόμησης και παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.

Πίνακας 5: Ανάλυση κατανάλωσης ενέργειας μετά τις προτεινόμενες παρεμβάσεις.

	Ενεργός κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Άεργος κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh)	Ειδική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh/m ²)
Θέρμανση	11.789	1.680	39.061	7,68
Ψύξη	18.171	2.589	60.205	11,84
Φωτισμός	39.685	0	115.086	22,64
Λοιπές καταναλώσεις	14.357	2.046	47.570	9,36
Παραγωγή από ΑΠΕ	58.125	0	168.563	33,16
Τελική κατανάλωση	25.878	6.315	93.359	18,36

6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται στις 880.000 € (με ΦΠΑ 24%), που αντιστοιχεί σε 176.83 €/m² κλιματιζόμενων χώρων. Ο προϋπολογισμός αυτός θεωρείται αρκετά ακριβής, αφού στηρίχθηκε σε αναλυτικές προμετρήσεις και προσφορές προμηθευτών - κατασκευαστών.

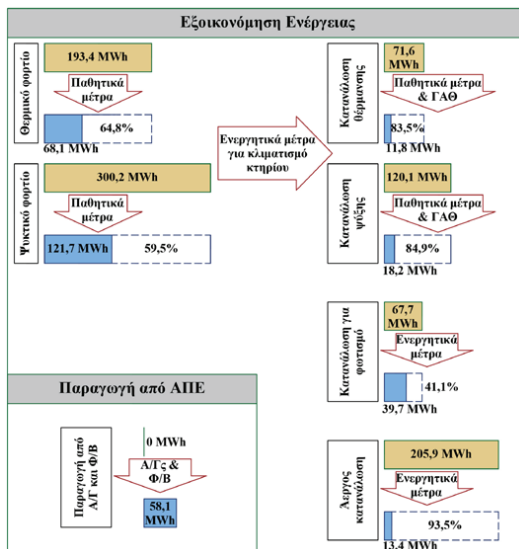
Από τους πίνακες 4 και 5 εκτιμάται ότι η συνολική εξοικονόμηση ενεργούς κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με 247.909 kWh. Λαμβάνοντας τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας 0,15029 €/kWh, υπολογίζεται ένα ετήσιο οικονομικό όφελος 37.258 €. Διαιρώντας το αρχικό κόστος των

προτεινόμενων παρεμβάσεων με το ετήσιο οικονομικό όφελος υπολογίζεται η άτοκη περίοδος αποπληρωμής στα 23,6 έτη.

7. ΕΠΙΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το έργο της ενεργειακής αναβάθμισης του ΜΦΙΚ θα υποβληθεί προς χρηματοδότηση στο Διασυνοριακό Πρόγραμμα «Ελλάδα - Κύπρος, 2014 – 2020» αποσκοπώντας σε ισχυρές επιδεικτικές δράσεις προς την καλλιέργεια «ενεργειακής παιδείας», με δεδομένο την ετήσια επισκεψιμότητα του Μουσείου από περισσότερους από 20.000 μαθητές.

Με το προτεινόμενο έργο, το κτήριο της έκθεσης του ΜΦΙΚ δείχνει το δρόμο από τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τις οποίες αρχικά στέγασε ως κτήριο της «Ηλεκτρικής Ηρακλείου», προς την εξοικονόμηση ενέργειας και τις ΑΠΕ. Επίσης, η συστέγαση στον ίδιο φυσικό χώρο εκθεμάτων προβολής της φυσικής Μεσογειακής κληρονομιάς και των τεχνολογιών εξοικονόμησης και παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ αποτυπώνει τη δυνατότητα συνύπαρξης της τεχνολογικής προόδου και της διατήρησης της βιοποικιλότητας. Συνεπώς οι προτεινόμενες δράσεις έχουν έντονο συμβολικό χαρακτήρα.



Εικόνα 7: Κατακόρυφο υδραυλικό διάγραμμα συστήματος γεωθερμίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στο Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης και στους ανθρώπους του για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη τους στην προσπάθειά μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων. Φ.Ε.Κ. 407 Β' /9-4-2010.
- [2] Omrany H., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Raahemifar K. and Tooke J., 2016, "Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62(89), 1252-1269.
- [3] Marin P., Saffari M., Gracia A., Zhu X., Farid M. M., Cabeza L. F. and Ushak S., 2016, "Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions", *Energy and Buildings*, 129(25), pp. 274-283.
- [4] Malet-Damour B., Guichard S., Bigot D. and Boyer H., 2016, "Study of tubular daylight guide systems in buildings: Experimentation, modelling and validation", *Energy and Buildings*, 129(27), pp. 308-321.
- [5] Rehman H. U., 2016, "Experimental performance evaluation of solid concrete and dry insulation materials for passive buildings in hot and humid climatic conditions", *Applied Energy*, 185-2(60), pp. 1585-1594.
- [6] Soares N., Costa J. J., Gaspar A. R. and Santos P., 2013, "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency", *Energy and Buildings*, 59(10), pp. 82-103.

- [7] Gaitani N., Mihalakakou G. and Santamouris M., 2007, "On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces", *Building and Environment*, 42(1), pp. 317-324.
- [8] Dimoudi A., Zoras S., Kantzioura A., Stogiannou X., Kosmopoulos P. and Pallas C., 2014, "Use of cool materials and other bioclimatic interventions in outdoor places in order to mitigate the urban heat island in a medium size city in Greece", *Sustainable Cities and Society*, 13(19), pp. 89-96.
- [9] Martins T. A.L., Adolphe L., Bonhomme M., Bonneaud F., Faraut S., Ginestet S, Michel C. and Guyard W., 2016, "Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France", *Sustainable Cities and Society*, 26(14), pp. 9-26.
- [10] Elnabawi M. H., Hamza N. and Dudek S., 2016, "Thermal perception of outdoor urban spaces in the hot arid region of Cairo, Egypt", *Sustainable Cities and Society*, 22(15), pp. 136-145.
- [11] Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδος. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701–1/2014: "Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης".
- [12] Molavi J. and McDaniel J., 2016, "A Review of the Benefits of Geothermal Heat Pump Systems in Retail Buildings", *Procedia Engineering*, 145(147), pp. 1135-1143.
- [13] Eicker U. and Vorschulze C. 2009, "Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation", *Renewable Energy*; 34(4), pp. 1126-1133.
- [14] Pahud D., Belliardi M. and Caputo P., 2012, "Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings", *Renewable Energy*, 45(23), pp. 197-204.
- [15] Lee J. U., Kim T. and Leigh S. B., 2015, "Applications of building-integrated coil-type ground-coupled heat exchangers—Comparison of performances of vertical and horizontal installations", *Energy and Buildings*; 93(10), pp. 99-109.
- [16] Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών: <http://www.poseidon.hcmr.gr> (πρόσβαση: 8/4/2017).
- [17] Haq M. A. , Hassan M. Y., Abdullah H., Rahman H. A., Abdullah M. P., Hussin F. and Said D. M., 2014, "A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33(25), pp. 268-279.
- [18] Fontoyront M., Ramananarivo K., Soreze T., Fernez G. and Guldhammer G. S., 2016, "Economic feasibility of maximising daylighting of a standard office building with efficient electric lighting", *Energy and Buildings*, 110(38), pp. 435-442.
- [19] Ciampi G., Rosato A., Scorpio M. and Sibilio S., 2015, "Retrofitting Solutions for Energy Saving in a Historical Building Lighting System", *Energy Procedia*, 78(445), pp. 2669-2674.
- [20] Labeodan T., Bakker C. D., Rosemann A. and Zeiler W., 2016, "On the application of wireless sensors and actuators network in existing buildings for occupancy detection and occupancy-driven lighting control", *Energy and Buildings*, 127(6), pp. 75-83.
- [21] Katsaprakakis D. A.I., Papadakis N., Kozirakis G., Minadakis Y., D. Christakis G. and Kondaxakis K., 2009, "Electrification of the island of Dia based on renewable energy sources", *Applied Energy*, 86(4), pp. 516–527.
- [22] Katsaprakakis D. A.I. and Christakis D. G., 2009, "Maximisation of R.E.S. penetration in Greek insular isolated power systems with the introduction of pumped storage systems", *Proc. European Wind Energy Conference and Exhibition, Marseille*, 7, pp. 4918-4930.

Έξυπνα δίκτυα - Λήψη αποφάσεων σε ενεργειακά έργα

ΑΣΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ: ΑΙΦΟΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΥΦΥΙΑΣ

Μαριάννα Μπίρη*, Ελευθερία Αλεξανδρή

Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα, e-mail: marian.biri@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πόνημα τούτο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της συνέργειας αστικού - ευφυούς διασυνδεδεμένου ψηφιακού τοπίου, υπό το πρίσμα της ενεργειακής αποδοτικότητας, της ανθεκτικότητας και της διάδρασης, εστιάζοντας στον αιφορικό σχεδιασμό των αστικών δημόσιων υπαίθριων χώρων και ιδιαίτερα των πλατειών. Εξετάζεται η μετάβαση από το συμβατικό στον τεχνολογικά ευφυή αιφορικό σχεδιασμό των δημόσιων χώρων. Δηλαδή, η μετάβαση μέσω μιας συνθετικής διαδικασίας ενσωμάτωσης του τεχνολογικά ευφυούς στο αστικό, η οποία δεν έχει πλέον κατ'ανάγκη τελεολογικά προκαθορισμένο λειτουργικό, μορφολογικό και δομικό αποτέλεσμα, αλλά χαρακτηρίζεται από διάδραση και δυναμική μεταβολής εντοπισμένων και διασυνδεδεμένων ποιτήτων. Γίνεται χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης (μέθοδος ELECTRE III), προκειμένου να αναλυθούν οι επιτόπιες παρατηρήσεις και τα σχετικά ερωτηματολόγια (χρηστών, φορέων, ειδημόνων), καθώς και εξέταση της θερμικής άνεσης (μέθοδος RayMan, πρόγραμμα Ecotect Analysis), ούτως ώστε να συστηματοποιηθούν και να αναλυθούν οι παράμετροι για την προσέγγιση διαφόρων εναλλακτικών σεναρίων αιφορικής ανάπτυξης της πλατείας Θράκης, στο Δήμο Λυκόβρυσσης- Πεύκης.

Εξετάζονται τρία εναλλακτικά σενάρια, εκτός του σεναρίου βάσης (υφιστάμενος συμβατικός σχεδιασμός πλατείας): το πρώτο σενάριο αφορά τον αιφορικό σχεδιασμό της πλατείας, χωρίς διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα (ψυχρά υλικά, υλικά φιλικά προς το περιβάλλον), το δεύτερο σενάριο αφορά τον αιφορικό σχεδιασμό της πλατείας με τεχνολογική ευφυΐα μεταβολής ιδιοτήτων (υλικά αλλαγής φάσης, θερμοχρωμικά, κοκ) και το τρίτο σενάριο εξετάζει τον αιφορικό σχεδιασμό της πλατείας με διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, κοκ). Τα σενάρια αυτά εξετάζονται τόσο υπό το πρίσμα κριτηρίων άμεσων επιρροών/οικονομικής ανάπτυξης (κόστος κατασκευής, κόστος συντήρησης, ποσοτική αποτίμηση οφελών παρεμβάσεων κοκ), όσο και υπό το πρίσμα κριτηρίων αιφορίας (μικροκλίμα, συνθήκες θερμικής άνεσης, ποιότητα τοπίου, προώθηση βιοποικιλότητας, διατήρηση φυσικών πόρων, μείωση αερίων θερμοκηπίου κοκ), καθώς και χωροκοινωνικά/πολιτισμικά κριτήρια (ποιότητα ζωής, κοινωνική ανάπτυξη, κοινωνική συνοχή, ισότητα, αποφυγή αποκλεισμών κοκ) μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Μέσω αυτής της μεθόδου, συγκροτείται ένα θεωρητικό πλαίσιο εξέτασης πρακτικών αιφορικού σχεδιασμού κοινοχρήστων χώρων και ανακύπτουν συμπεράσματα για την εφαρμογή τεχνολογικής ευφυΐας στον αιφορικό σχεδιασμό και στην ενεργειακή διαχείριση αστικών δημόσιων υπαίθριων χώρων.

Λέξεις Κλειδιά: πλατεία, ανθεκτικότητα, τεχνολογική ευφυΐα, μετάβαση, πολυκριτηριακή ανάλυση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αστικό τοπίο αποτελείούσε και αποτελεί ένα πολύπλοκο σύστημα δομημένο στον αλληλοσυσχετισμό επιμέρους υποσυστημάτων, ικανό να μεταλλάσσεται συν τω χρόνω. Σήμερα, η διαρκώς αυξανόμενη τάση ενσωμάτωσης αρχών αειφορίας στο σχεδιασμό του αστικού τοπίου, η συνεχής εξέλιξη των δυνατοτήτων της τεχνολογικής ευφυΐας και το αυξανόμενο ενδιαφέρον των δημόσιων φορέων για την ένταξη πρακτικών ενεργειακής διαχείρισης στη στρατηγική τους, επικεντρώνουν το ενδιαφέρον της παρούσας προσέγγισης στη μετάβαση από τον συμβατικό στον τεχνολογικά ευφυή αειφορικό σχεδιασμό των δημόσιων χώρων και δη των πλατειών.

Αστικό και ευφυές διασυνδεδεμένο ψηφιακό τοπίο διαδρούν υπό τη συνθήκη της διασυνδεδεμένης μεταβλητότητας, ως ένα ενιαίο σύστημα σε κατάσταση δυναμικής μεταβολής εντοπισμένων και διασυνδεδεμένων ποιοτήτων. Το λειτουργικό, μορφολογικό και δομικό αποτέλεσμα δεν είναι κατ' ανάγκη τελεολογικά προκαθορισμένα. Επαναπροσδιορίζονται ως κοινοί όροι έρευνας: η διάδραση, η ανθεκτικότητα και η ενεργειακή αποδοτικότητα. Σκοπός είναι η ανάγνωση και η καταγραφή (μέθοδοι: ενεργειακές καταναλώσεις, "αποτύπωμα άνθρακα", επιτόπιες παρατηρήσεις, ερωτηματολόγια), η ερμηνεία και η πολυκριτηριακή αξιολόγηση ποιοτικών/ποσοτικών συσχετίσεων συνέργειας αστικού-ευφυούς διασυνδεδεμένου ψηφιακού τοπίου. Η αξιολόγηση μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης (μέθοδος: ELECTRE III) και η εξέταση συνθηκών θερμικής άνεσης (μέθοδος RayMan, πρόγραμμα ecotect analysis). Η συστηματοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης τριών εναλλακτικών σεναρίων αιφορικών παρεμβάσεων μέσω τεχνολογικής ευφυΐας του πεδίου εφαρμογής (σύγχρονη ελληνική αστική "πλατεία γειτονιάς"). Μία συνθετική διαδικασία συγκερασμού θεωρητικής προσέγγισης και σχεδιαστικής ενσωμάτωσης του τεχνολογικά ευφυούς στο αστικό τοπίο πραγματοποιείται μέσω διαδοχικής μετάβασης από τα συμβατικά, στα τεχνολογικά ευφυή, στα διασυνδεδεμένα τεχνολογικά ευφυή υλικά/δομές/συστήματα. Ερευνώνται συσχετίσεις αρχιτεκτονικών, ψηφιακών, περιβαλλοντικών, ενεργειακών και κοινωνικοοικονομικών συνιστωσών.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μεθοδολογικά ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:

A. Θεωρητική προσέγγιση όρων, διαδικασιών και μεθοδολογικών εργαλείων έρευνας (ενεργειακές καταναλώσεις, υπολογισμός "αποτυπώματος άνθρακα", επιτόπια παρατήρηση, ερωτηματολόγια σε θαμώνες και ιθύνοντες, προσομοίωση συνθηκών θερμικής άνεσης (RayMan, Ecotect Analysis). Τα κριτήρια αυτά συνδυάζονται και αξιολογούνται με την πολυκριτηριακή μέθοδο ELECTRE III.

B. Ορισμός και περιγραφή επιλεγμένου πεδίου εφαρμογής (case study). Κριτική ανάλυση γενικών και ειδικών χαρακτηριστικών μίας αντιπροσωπευτικής σύγχρονης "πλατείας γειτονιάς" εντός του ελληνικού αστικού ιστού -πλατεία Θράκης, Δήμου Λυκόβρυσης-Πεύκης. Εξέταση τριών εναλλακτικών σεναρίων αιφορικών παρεμβάσεων μέσω τεχνολογικής ευφυΐας- εκτός του σεναρίου βάσης (υφιστάμενος συμβατικός σχεδιασμός πλατείας). Το πρώτο σενάριο αφορά τον αειφορικό σχεδιασμό της πλατείας, χωρίς διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα (ψυχρά υλικά και περιβαλλοντικά φιλικά υλικά), το δεύτερο σενάριο αφορά τον αειφορικό σχεδιασμό της πλατείας με τεχνολογική ευφυΐα μεταβολής ιδιοτήτων (υλικά αλλαγής φάσης, θερμοχρωμικά, κοκ) και το τρίτο σενάριο εξετάζει τον αειφορικό σχεδιασμό της πλατείας με διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά στοιχεία, πιεζοηλεκτρικά κοκ).

Γ. Συστηματοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης, προσδιορισμός ομάδων εμπλεκόμενων δικαιούχων/φορέων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων υλοποίησης και εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου αξιολόγησης ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων για τα εναλλακτικά σενάρια.

Δ. Συνολική κριτική επισκόπηση έρευνας και καταγραφή συμπερασματικών θέσεων.

2.1. Αστικό και ευφυές διασυνδεδεμένο ψηφιακό τοπίο

Το αστικό τοπίο υπό την ενσωμάτωση της τεχνολογικής ευφυΐας επαναπροσδιορίζεται, στην εκδοχή της συνέργειας αστικού και ευφυούς διασυνδεδεμένου ψηφιακού τοπίου. Με ρυθμιστές τις κοινωνικοοικονομικές δομές, τις πολιτισμικές διεργασίες, την τεχνολογική ευφυΐα και τις πρακτικές αειφορικού σχεδιασμού, επαναδιαμορφώνεται ο σύγχρονος αρχιτεκτονικός, κοινωνικοοικονομικός, ενεργειακός, περιβαλλοντικός και συμβολικός χαρακτήρας του. Αστικό και ευφυές διασυνδεδεμένο ψηφιακό τοπίο διαδρούν ως ένα ενιαίο σύστημα σε κατάσταση δυναμικής μεταβολής τοπικών και

ψηφιακών συνιστωσών. Ως αστικός υποδοχέας επιλέγεται η σύγχρονη “πλατεία”¹ και ειδικότερα η σύγχρονη “πλατεία γειτονιάς”, εντός του ελληνικού αστικού ιστού. Ενδιαφέρει η “πλατεία γειτονιάς”, καθώς χαρακτηρίζεται πρωτίστως για το διπλό ρόλο της, ως χώρος διείσδυσης του φυσικού στο δομημένο περιβάλλον, και ταυτόχρονα ως τόπος κοινωνικής διάδρασης, καθώς εντός της συμπυκνώνονται και αντικατοπτρίζονται χαρακτηριστικά, σχέσεις, δυναμικές και ποιότητες της αστικής δομής της σύγχρονης ελληνικής “γειτονιάς”². Η “πλατεία γειτονιάς” μετατρέπεται από μία άκαμπτη κατασκευή, δημιουργήμα μιας δεδομένης χρονικής στιγμής βάσει ισχυουσών αρχών, σε ένα δυναμικό και τεχνολογικά ευφυές πεδίο διαβίωσης για τους χρήστες, με τους χρήστες. Το “είναι” (being) μετατρέπεται σε “γίνεσθαι” (becoming) [1]. Δημιουργούνται νέες δυναμικές και σχέσεις από τη διαρκή επαναδιαπραγμάτευσή του, μέσω σχεδιαστικών πρακτικών και διαδικασιών ενσωμάτωσής του τεχνολογικά ευφυούς στο αστικό.

Η τεχνολογική ευφυΐα αναφέρεται στη δυνατότητα αυτοελέγχου και αυτορρύθμισης ευφών υλικών αποκρινόμενων σε εξωγενή ερεθίσματα. Τα ευφυή υλικά φέρουν ως βασικά χαρακτηριστικά τη δυνατότητα αναγνώρισης ενός ερεθίσματος, τη λήψη ευφυούς απόφασης και απόκρισης στο ερέθισμα μέσω κατάλληλης ανατροφοδότησης [2]. Χρησιμοποιούμενα συνδυαστικά με αισθητήρες και ενεργοποιητές που διασυνδέονται μεταξύ τους και με ένα κεντρικό λογισμικό ελέγχου, λειτουργούν ως ενιαία συστήματα και δομές, με διαδραστικά χαρακτηριστικά και ευφυή συμπεριφορά, ανταποκρινόμενα σε χρονικές, κλιματικές και εποχιακές εναλλαγές του περιβάλλοντός τους [3]. Στην παρούσα προσέγγιση η τεχνολογική ευφυΐα προσεγγίζεται μέσω διαδοχικής μετάβασης από τα συμβατικά, στα εξελιγμένων ιδιοτήτων, στα τεχνολογικά ευφυή μεταβολής ιδιοτήτων, στα διασυνδεδεμένα τεχνολογικά ευφυή παραγωγής ενέργειας υλικά/δομές/συστήματα.

2.2. Μεθοδολογικά εργαλεία έρευνας

2.2.1. Ενεργειακές καταναλώσεις

Συλλέγονται τα ετήσια δεδομένα ενεργειακών καταναλώσεων της πλατείας Θράκης, από τα αρχεία του Δήμου Λυκόβρυσσης - Πεύκης για την περίοδο 2011-2015. Οι ετήσιες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζονται κυρίως με τη χρήση, τη λειτουργία και τη συντήρηση της πλατείας.

Πίνακας 1: Ετήσιες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας - εκπομπές αερίων θερμοκηπίου πλατείας

Έτος	Ετήσια κατανάλωση (kWh)	Ετήσια κατανάλωση ανά m ² (kWh/m ²)	Ετήσια εκπομπή CO ₂ ανά m ² (kg/m ²)
2011	9.398,00	4,75	4,69
2012	6.718,00	3,39	3,36
2013	8.703,00	4,40	4,35
2014	10.546,00	5,33	5,27
2015	8.519,00	4,30	4,26
M.O.:	8.776,80	4,43	4,39

Τα ενεργειακά δεδομένα ανάγονται στην έκταση της πλατείας (kWh/m²) και μετατρέπονται σε “αποτύπωμα άνθρακα”, μέσω του συντελεστή αναγωγής της κατανάλωσης ενέργειας σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για την Ελλάδα (0,989kg CO₂/kWh για την ηλεκτρική ενέργεια) [4]. Σκιαγραφείται με αυτό τον τρόπο το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πλατείας.

2.2.2. Επιτόπια παρατήρηση

Η επιτόπια παρατήρηση της υφιστάμενης πλατείας γειτονιάς πραγματοποιείται για τις τρεις εποχές του έτους 2017 (χειμώνα, άνοιξη, θέρος), σε διαφορετικές ημέρες (καθημερινές και σαββατοκύριακο) και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα της ημέρας (10:00-12:00, 16:00-18:00, 20:00-22:00).

Αποτυπώνεται η ποσοστιαία καταγραφή των μεταβολών, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Διαπιστώνεται ότι τις καθημερινές (πρωί και απόγευμα) πλειοψηφούν οι ηλικιακές ομάδες των 0-18

¹ Μεταξύ άλλων, θεωρείται αντιπροσωπευτική η προσέγγιση της “πλατείας” ως ο “εγκεκριμένος κοινόχρηστος χώρος του ρυμοτομικού σχεδίου” (Ν.4067/2012, ΦΕΚ 79/Α’/9-4-2012). Δηλαδή, ως ο εγκεκριμένος κοινόχρηστος χώρος που έχει απαλλοτριωθεί για πολεοδομικό σκοπό και δημόσιο όφελος και δεν αποτελεί απλά τον κενό χώρο, που προκύπτει τυχαία ως υπόλειμμα του κτισμένου χώρου, αλλά δυναμικό πεδίο με χωρική και λειτουργική συγκρότηση, συμβολικό χαρακτήρα και κοινωνικό περιεχόμενο.

² Στον ελληνικό αστικό ιστό η “γειτονιά” αποδίδεται ως οργανική “Πολεοδομική Ενότητα”. “Οι εντάξεις και επεκτάσεις σχεδίων πόλεων γίνεται κατά οργανικές πολεοδομικές ενότητες (γειτονίες)” (Ν.1337/1983, άρθρο 1, παρ.3).

ετών. Αντίστοιχα, το σαββατοκύριακο (πρωί) πλειοψηφούν οι ηλικιακές ομάδες των 0-18 ετών, έπονται αυτές των 31-45 και 46-60 ετών. Τις καθημερινές (βράδυ) και το σαββατοκύριακο (απόγευμα και βράδυ) καταγράφεται διακύμανση της ποσοστιαίας κατανομής των ηλικιακών ομάδων ανά εποχή. Εκτιμάται αυξητική τάση του αριθμού των χρηστών από τη χειμερινή στη θερινή περίοδο.

Πίνακας 2: Επιτόπια ποσοστιαία καταγραφή χρηστών - Χειμώνας (Δεκέμβριος – Φεβρουάριος)

Ηλικιακές ομάδες	Καθημερινές			Σαββατοκύριακο		
	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00
0-18	45,45%	31,25%	0,00%	26,67%	26,09%	20,00%
18-30	0,00%	25,00%	100,00%	13,33%	21,74%	40,00%
31-45	18,18%	25,00%	0,00%	20,00%	26,09%	20,00%
46-60	9,09%	18,75%	0,00%	20,00%	21,74%	20,00%
>61	27,27%	0,00%	0,00%	20,00%	4,35%	0,00%
Σύνολο	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

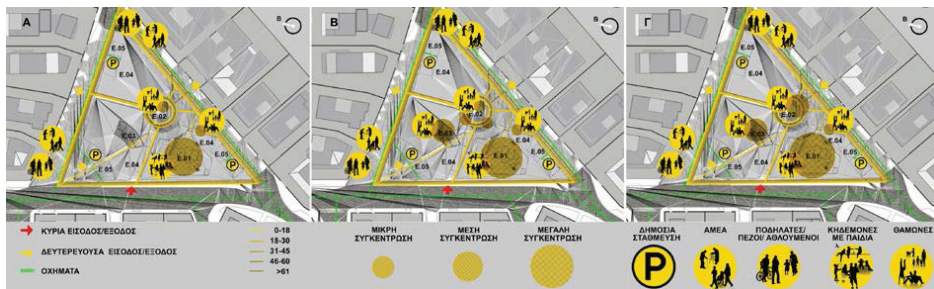
Πίνακας 3: Επιτόπια ποσοστιαία καταγραφή χρηστών - Άνοιξη (Μάρτιος - Απρίλιος)

Ηλικιακές ομάδες	Καθημερινές			Σαββατοκύριακο		
	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00
0-18	50,00%	60,00%	54,55%	44,44%	65,00%	46,67%
18-30	6,25%	10,00%	36,36%	14,81%	10,00%	20,00%
31-45	6,25%	15,00%	0,00%	14,81%	10,00%	20,00%
46-60	18,75%	10,00%	9,09%	14,81%	15,00%	13,33%
>61	18,75%	5,00%	0,00%	11,11%	0,00%	0,00%
Σύνολο	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Πίνακας 4: Επιτόπια ποσοστιαία καταγραφή χρηστών - Θέρος (Ιούλιος)

Ηλικιακές ομάδες	Καθημερινές			Σαββατοκύριακο		
	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00	10:00-12:00	16:00-18:00	20:00-22:00
0-18	42,11%	41,67%	36,36%	45,45%	46,15%	50,00%
18-30	10,53%	20,83%	22,73%	9,09%	15,38%	12,50%
31-45	15,79%	25,00%	13,64%	13,64%	23,08%	12,50%
46-60	15,79%	12,50%	13,64%	18,18%	15,38%	12,50%
>61	15,79%	0,00%	13,64%	13,64%	0,00%	12,50%
Σύνολο	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Μεθοδολογικά, η ποιοτική προσέγγιση της ποικιλομορφίας της κοινωνικής συνδιαλλαγής της πλατείας, ως μια δυναμική πραγματικότητα, προσεγγίζεται μέσω επιτόπιας δειγματοληπτικής καταγραφής των δρώντων χρηστών. Επιδιώκεται ο εντοπισμός, η κατανόηση και η ερμηνεία των χαρακτηριστικών των ομάδων των χρηστών και του τρόπου που βιώνουν και νοηματοδοτούν τη συγκεκριμένη πλατεία γειτονιάς. Αποτυπώνεται διαγραμματικά μέσω ρούν κίνησης, η εποχιακή διακύμανση των δρώντων χρηστών, όπως αυτοί εντάσσονται και κατανέμονται σε έκαστο πεδίο δράσης τους εντός της πλατείας. Η παιδική χαρά (Ε.01) αποτελεί το βασικό κίνητρο επισκεψιμότητας της πλατείας Θράκης. Καταγράφεται ως ένας ζωντανός πυρήνας πολύωρης χρήσης, ετησίως, πρωτίστως λόγω επαρκούς σκίασης τις πρωινές και απογευματινές θερινές ώρες και ενδημικών φυτεύσεων. Ωστόσο, δεν συγκεντρώνει το ενδιαφέρον του συνόλου των δρώντων χρηστών, αλλά κυρίως των κηδεμόνων με μικρά παιδιά. Οι χώροι καθιστικών, στάσης και σιντριβανιού (Ε.02, Ε.03) αν και προσβάσιμοι από το σύνολο των χρηστών και επαρκώς σκιασμένοι, μέσω φυτεύσεων ελλείπει ιδιαίτερων οπτικών ερεθισμάτων και προκλήσεων δεν καθίστανται θελκτικοί. Ελκύουν ορισμένες ομάδες χρηστών, κυρίως εφήβους και ηλικιωμένους, για ολιγόωρη και περιστασιακή χρήση, χωρίς να είναι πολυσύχναστοι και να προάγονται συνθήκες κοινωνικής αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας. Η ελλιπής συντήρηση και καθαρισμός του σιντριβανιού οδηγεί σε συνθήκες δυσφορίας και απεχθούς οσμητικού τοπίου. Αρκετές ηλικιακές ομάδες, είτε εισέρχονται αδιάφορα και στιγμιαία στην πλατεία, χωρίς να αποζητούν χωροκοινωνική συνδιαλλαγή, είτε την αντιμετωπίζουν ως πέρασμα, ως πεζοί, ποδηλάτες, αθλούμενοι.



Εικόνα 1: Διαγράμματα ροών-διακύμανσης-συγκέντρωσης χρηστών, Α. Χειμώνα, Β. Άνοιξη, Γ. Θέρος

2.2.3. Ερωτηματολόγια: χρηστών - φορέων - ειδημόνων

Παράλληλα, αξιοποιούνται μέθοδοι ποσοτικής και ποιοτικής έρευνας, για την εστιασμένη συγκέντρωση δεδομένων, συγκρίσιμων μεταξύ τους, μέσω διανομής ερωτηματολογίων στους δρώντες χρήστες της πλατείας Θράκης και ηλεκτρονικών ερωτηματολογίων σε φορείς (ΟΤΑ Α' , Β' βαθμού) και ειδήμονες. Η έρευνα πραγματοποιείται από τον Απρίλιο έως το Μάιο 2017, μέσω ερωτηματολογίων δομημένου τύπου, με συνδυασμό ερωτήσεων κλειστού (ποσοτική ανάλυση) και ανοικτού τύπου (ποιοτική ανάλυση). Οι κλειστού τύπου ερωτήσεις, φέρουν συγκεκριμένες εναλλακτικές απαντήσεις δομημένες στο πρότυπο της πενταβάθμιας κλίμακας Likert (Κλίμακα Αθροιστικής Βαθμολόγησης) [5]. Επιδιώκεται η μέτρηση των στάσεων, πεπειθήσεων και απόψεων. Βάσει της παραδοχής ότι η συνολική βαθμολογία ενός ατόμου στην κλίμακα δεικνύει τη στάση του [6]. Άλλου τύπου κλειστές ερωτήσεις είναι οι διχοτόμες ερωτήσεις, τύπου ναι/όχι και οι ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής με δυνατότητα επιλογής περισσότερων της μιας απαντήσεων. Οι ανοικτού τύπου ερωτήσεις εστιάζουν στον ελεύθερο σχολιασμό από τον ερωτώμενο, χωρίς περιορισμούς. Αποτελούν δείκτες ποιοτικής στάθμησης. Οι ερωτήσεις περιγραφικών ποιοτικών χαρακτηριστικών των ερωτηθέντων, κατηγοριοποιούνται ως δημογραφικά δεδομένα (όπως ηλικία, φύλο κ.ά.). Οι απαντήσεις των ερωτηθέντων είναι ενδεικτικές και αντιπροσωπευτικές. Η δειγματοληπτική συλλογή δεδομένων αποτυπώνει παρούσες και μελλοντικές τάσεις αξιοποίησης της πλατείας γειονίας στο Ελληνικό αστικό περιβάλλον. Τα επεξεργασμένα αποτελέσματα της έρευνας αξιοποιούνται στη συγκρότηση των εναλλακτικών σεναρίων αιφρορικών παρεμβάσεων και στη στάθμιση της βαρύτητας των κριτηρίων για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης [7].

2.2.4. Μέθοδος προσομοίωσης συνθηκών θερμικής άνεσης: RayMan

Η "θερμική άνεση" αποτελεί ουσιαστικά μια υποκειμενική έννοια, καθώς σε μεγάλο βαθμό διαμορφώνεται από παράγοντες περιβαλλοντικούς, ατομικούς και ψυχολογικούς, εξού και η αίσθηση θερμικής άνεσης για τον ίδιο χώρο, την ίδια χρονική στιγμή και την ίδια εποχή του χρόνου, δύναται να διαφέρει από άτομο σε άτομο [8], [9]. Ωστόσο, παρά την υποκειμενικότητα των παραγόντων διαμόρφωσης της αίσθησης θερμικής άνεσης, εφαρμόζονται μέθοδοι μέτρησης και ποσοτικοποίησης της, μέσω δεικτών. Εν προκειμένω, επιλέγεται ως καταλληλότερος ο δείκτης προβλεπόμενης μέσης ψήφου PMV (Predicted Mean Vote), εφαρμόζομενος μέσω του μοντέλου προσομοίωσης RayMan [10], [11].

Για την εφαρμογή του μοντέλου RayMan προσδιορίζονται η γεωγραφική θέση της πλατείας Θράκης, οι μέσες μηνιαίες τιμές κλιματικών δεδομένων, ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και νεφοκάλυψης, η μέση τιμή λευκαύγειας, ρυθμού μεταβολισμού και θερμικής αντίστασης (ψυχρής και θερμής περιόδου). Καθορίζονται ο παράγοντας θέασης του ουρανού (Sky View Factor), μέσω αντιπροσωπευτικής φωτογραφίας (Fisheye) και προσδιορίζεται το ποσοστό θέασης του ορίζοντα (horizon limitation). Τα αποτελέσματα του μοντέλου RayMan συγκρίνονται με την αίσθηση θερμικής άνεσης για τις αντιπροσωπευτικές ομάδες χρηστών, όπως αυτή προκύπτει από τα ερωτηματολόγια και την επιτόπια παρατήρηση. Οι εξαγόμενες διαπιστώσεις κατευθύνουν τις αιφρορικές παρεμβάσεις των εναλλακτικών σεναρίων. Εν συνέχεια, συγκρίνονται ποσοτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θερμικής άνεσης πριν και μετά τις αιφρορικές παρεμβάσεις μέσω τεχνολογικής ευφυΐας.

2.2.5. Προσομοίωση κατά Ecotect Analysis

Συνδυαστικά χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Ecotect Analysis, για τις συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης της πλατείας Θράκης και τις αναππυσσόμενες θερμοκρασίες, πριν και μετά τις αιφρορικές παρεμβάσεις. Για την εφαρμογή του προσδιορίζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές των κλιματικών

δεδομένων, ο προσανατολισμός και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της πλατείας, η αστική γεωμετρία του άμεσου περιβάλλοντος της, οι τιμές ιδιοτήτων των υλικών, τα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων εδών ψηλής και χαμηλής φύτευσης. Τα αποτελέσματα παράγονται μέσω διαγραμμάτων εμβέλειας σκιών (shadow range) για ετήσια κίνηση του ήλιου και την προσομοίωση της μεταβολής των σκιών εντός/πέραν της πλατείας, για το θερινό ηλιοστάσιο, το χειμερινό ηλιοστάσιο και την εαρινή ισημερία. Διαγραμμάτων ανεμοροής (airflow rate) για την αποτύπωση ροής και ταχύτητας των επικρατούντων βόρειων και νοτιοδυτικών ανέμων. Διαγραμμάτων ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας (solar radiation analysis) για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και τον μέσο αριθμό ωρών ηλιοφάνειας που δέχεται έκαστο τμήμα της πλατείας. Στερεογραφικών διαγραμμάτων (stereographic diagram) για την στερεογραφική προβολή εμποδίων, ωρών ηλιασμού/σκίασης, ετησίως σε επιλεγμένα σημεία της πλατείας.

2.2.6. Πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης: ELECTRE III

Ο αειφορικός επανασχεδιασμός μέσω τεχνολογικής ευφυΐας αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία επαναπροσδιορισμού και συσχέτισης ταυτόχρονα πολυδιάστατων αρχιτεκτονικών, ψηφιακών, περιβαλλοντικών, ενεργειακών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων. Για τη συγκριτική αξιολόγηση πολυειδών ποιοτικών/ποσοτικών συσχετίσεων, εφαρμόζεται η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης ELECTRE III. Μία σύνθετη, ευρέως διαδεδομένη και εφαρμοσμένη μέθοδος, βασισμένη σε σχέσεις υπεροχής διακριτών επιλογών [12].

Για την εφαρμογή της ELECTRE III, εντοπίζονται οι εμπλεκόμενες ομάδες δικαιούχων που επηρεάζονται άμεσα/έμμεσα ή έχουν άμεσο/έμμεσο όφελος, από την υλοποίηση έκαστου σεναρίου εξού και ενδιαφέρει η συμμετοχή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Επιλέγονται οι δρώντες χρήστες της πλατείας Θράκης, οι φορείς (Δήμος Λυκόβρυσσης-Πεύκης και Περιφέρεια Αττικής) και οι ειδήμονες διαφόρων ειδικοτήτων σχετικών με τον αειφορικό σχεδιασμό μέσω τεχνολογικής ευφυΐας. Συγκεκριμενοποιούνται τα κριτήρια πολυκριτηριακής αξιολόγησης και ομαδοποιούνται σε πέντε βασικές κατηγορίες (κοινωνική ανάπτυξη, περιβαλλοντική διαχείριση/αειφορία, οικονομική ευρωστία, τεχνολογική ανάπτυξη/ενεργειακή διαχείριση, πολιτική/πρακτικές/στρατηγική). Η βαρύτητα, το εύρος και η ένταση έκαστου κριτηρίου διαφοροποιούνται. Για την έρευνα επιλέγονται από εκάστη κατηγορία τα καταλληλότερα κριτήρια - με την προϋπόθεση ότι βαθμολογούνται σε ικανή κλίμακα. Για την κοινωνική ανάπτυξη επιλέγονται η θελκτικότητα, η διάδραση και η συμμετοχή. Για την περιβαλλοντική διαχείριση/αειφορία επιλεγμένα κριτήρια είναι το τοπίο, το μικρόκλιμα, οι συνθήκες θερμικής άνεσης και το “αποτύπωμα άνθρακα”, συναρτήσει της εκτιμώμενης βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Για την οικονομική ευρωστία επιλέγεται το κόστος επένδυσης κατασκευής. Για την τεχνολογική ανάπτυξη/ενεργειακή διαχείριση επιλέγονται η ενεργειακή αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα. Για την πολιτική/πρακτικές/στρατηγική επιλεγμένα κριτήρια είναι το ΣΔΑΕ του Δήμου Λυκόβρυσσης- Πεύκης και η συμμετοχική πολιτική.

Ακολουθεί η βαθμολόγηση των επιλεγθέντων κριτηρίων, μέσω της απόδοσης τιμών για έκαστο σενάριο. Τα κριτήρια θελκτικότητα, διάδραση, συμμετοχή, τοπίο, μικρόκλιμα/συνθήκες άνεσης και συμμετοχική πολιτική/βαθμολογούνται για το σενάριο βάσει της μέσης ποσοτικοποίησης (μέσων όρων) των σχετικών απαντήσεων των ερωτηματολογίων (χρηστών/φορέων/ειδημόνων). Αντίστοιχα, για τα τρία εναλλακτικά σενάρια τα κριτήρια βαθμολογούνται από τους μέσους όρους των σχετικών απαντήσεων των ηλεκτρονικών ερωτηματολογίων φορέων/ειδημόνων. Από τα δεδομένα της ανάλυσης, καθίσταται γνωστή η τάση βελτίωσης έκαστου εναλλακτικού σεναρίου, η οποία καθορίζει και την απόδοση των τιμών των κριτηρίων εντός της κλίμακας που έχει τεθεί. Εξού και οι τιμές των κριτηρίων ανάγονται κατά περίπτωση εναλλακτικού σεναρίου και προκύπτουν συγκριτικά. Οι συνθήκες θερμικής άνεσης κατά RayMan βαθμολογούνται βάσει του μέσου όρου των τιμών του δείκτη PMV, όπως προκύπτει πριν και μετά τις παρεμβάσεις. Το κόστος επένδυσης κατασκευής, καθώς ούτε είναι θεμιτή η “φωτογραφική προσέγγιση”, ούτε ζητούμενο η κοστολόγηση συγκεκριμένων προϊόντων, μέσω τεchnοοικονομικής ανάλυσης Αναλυτικών Τιμολογίων Οικοδομικών Έργων (ΑΤΟΕ), βαθμολογείται βάσει αντιπροσωπευτικής διακύμανσης εκτιμώμενου κόστους, κατά περίπτωση σεναρίου. Κόστος επένδυσης, ενεργειακή αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα, “αποτύπωμα άνθρακα” και ΣΔΑΕ βαθμολογούνται συγκριτικά για έκαστο σενάριο. Η τάση βελτίωσης έκαστου σεναρίου είναι γνωστή και καθορίζει την εκτίμηση των τιμών, συγκριτικά, εντός της κλίμακας που έχει τεθεί.

Για την εφαρμογή της ELECTRE III, προσδιορίζονται τα βάρη των προς εξέταση κριτηρίων. Βάσει των οριζόμενων της μεθόδου, το σύνολο των τιμών των βαρών των κριτηρίων έχει άθροισμα ένα (1) [13]. Εφαρμόζεται η μέθοδος απόδοσης πόντων (Point method) του πρόσθετου προγράμματος SANNA, για τους πόντους των κριτηρίων, σε αντιστοιχία με τα βάρη αυτών. Τα βάρη υποδηλώνουν την σημαντικότητα των κριτηρίων στην κατάταξή τους. Ορίζεται ως βέλτιστη η μεγαλύτερη τιμή [14], [15].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Σενάριο βάσης: Υφιστάμενος συμβατικός σχεδιασμός

Το σενάριο βάσης συνοψίζει τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης της πλατείας Θράκης. Δεικνύεται η ανάγκη αιεφορικής διαχείρισης του δημόσιου χώρου, εκσυγχρονισμού σχεδιαστικών πρακτικών, ένταξης της πλατείας ως κόμβου σε ένα ευρύτερο δίκτυο αστικών δημόσιων υπαίθριων χώρων, εφαρμογής αρχών βιώσιμης κινητικότητας, βελτίωσης οικονομικού, ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος και συνθηκών θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης, ανάδειξης της πλατείας ως πυρήνα κοινωνικής ζωής για το σύνολο των χρηστών.

Τα ερωτηματολόγια των δρώντων χρηστών της πλατείας Θράκης αποκαλύπτουν ότι οι χρήστες προέρχονται κυρίως από την άμεση περιοχή, τη “γειτονιά” (64,44%), χρησιμοποιούν την πλατεία σε καθημερινή βάση (40,00%) τις πρωινές ώρες (48,89%) ως κηδεμόνες για την ψυχαγωγία νηπίων/παιδών, για στάση/χαλάρωση, κοινωνική διάδραση. Επικρατούν οι γυναίκες έναντι των ανδρών (60%-40%). Οι ηλικιακές ομάδες εκπροσωπούνται σχεδόν ισομερώς. Αποτυπώνεται η άποψη των ερωτηθέντων για το παρόν και το μέλλον της πλατείας τους. Η πλειοψηφία θεωρεί ικανοποιητικό τον υφιστάμενο σχεδιασμό της (84,44%), παρά τις αδυναμίες συντήρησης και καθαριότητας του χώρου (82,22%). Ενδεχόμενη αιεφορική ανάπτυξή της αντιμετωπίζεται ιδιαίτερα θετικά (91,11%), όπως και η ένταξη στον επανασχεδιασμό πρακτικών συμμετοχικού σχεδιασμού (80,00%). Πλειοψηφικά συμφωνούν στην ενσωμάτωση συστημάτων τεχνολογικής ευφυΐας, για ενεργειακή αποδοτικότητα και βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών/συνθηκών θερμικής άνεσης (93,33%). Προτιμάται η διαμόρφωση χώρων κοινωνικής αλληλεπίδρασης όλων των ηλικιών (71,11%), χώρων τραπέζοκαθισμάτων (60,00%), χώρων πρασίνου/στοιχείων νερού (46,67%) και αθλοπαιδιών ενηλίκων (44,44%). Αντιμετωπίζεται ιδιαίτερα θετικά η ενσωμάτωση συστημάτων παραγωγής ενέργειας (90,48%) και συλλογής/ανακύκλωσης/αποθήκευσης νερού (69,05%).

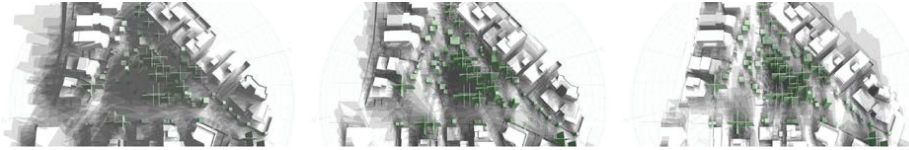
Οι χρήστες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ωστόσο καίριο ρόλο στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση μίας ανάπτυξης φέρουν οι ειδήμονες και οι φορείς (Δήμος Λυκόβρυσης - Πεύκης, Περιφέρεια Αττικής).

Κατά πλειοψηφία οι ειδήμονες ανήκουν στις ειδικότητες των αρχιτεκτόνων (36,67%) και των πολιτικών μηχανικών (16,67%), οι ερωτηθέντες του Δήμου και της Περιφέρειας Αττικής σχετίζονται κυρίως με τεχνικά έργα. Οι ερωτηθέντες τάσσονται ιδιαίτερα θετικά στο ότι ο σχεδιασμός μίας “πλατείας γειτονιάς” πρέπει να εντάσσεται στην κλίμακα και στη φυσιογνωμία της γειτονιάς (86,67% ειδήμονες, 81,25% φορείς), στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τόπου και στην αισθητική του τοπίου (86,66% ειδήμονες, 68,75% φορείς) και να αναδεικνύει τους χώρους φυτεύσεων (96,67% ειδήμονες, 62,50% φορείς). Θετικές τάσεις καταγράφονται για την ανάδειξη της “πλατείας γειτονιάς”, ως χώρο ψυχαγωγίας όλων των ηλικιών (60,00% ειδήμονες, 56,25% φορείς), ως πυρήνα κοινωνικής ζωής (60,00% ειδήμονες, 62,50% φορείς) και χωροκοινωνικής συμμετοχής του πολίτη (43,33% ειδήμονες, 56,25% φορείς). Κατά πλειοψηφία θεωρούν ότι μία “πλατεία γειτονιάς” πρέπει να δημιουργεί αίσθηση ασφάλειας και να αποτρέπει παραβατικές δραστηριότητες (80,00% ειδήμονες, 87,50% φορείς), να προβλέπει μέτρα για την ασφαλή κινητικότητα και την ανεμπόδιστη προσβασιμότητα του συνόλου των χρηστών (80,00% ειδήμονες, 62,50% φορείς). Οι ερωτηθέντες τάσσονται υπέρ της συμβολής του αιεφορικού σχεδιασμού μίας “πλατείας γειτονιάς” στη διατήρηση των φυσικών πόρων (80,00% ειδήμονες, 43,75% φορείς), στη βελτίωση του μικροκλίματος και συνθηκών θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης (90,00% ειδήμονες, 75,00% φορείς). Η αιεφορική ανάπτυξη μίας “πλατείας γειτονιάς” κρίνεται σκόπιμη (86,67% ειδήμονες, 93,75% φορείς), καθώς και η ενσωμάτωση συστημάτων τεχνολογικής ευφυΐας, για την ενεργειακή αναβάθμιση και τη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών/συνθηκών θερμικής άνεσης (90,00% ειδήμονες, 81,25% φορείς). Ιδιαίτερα θετική στάση καταγράφεται για τις πρακτικές συμμετοχικού σχεδιασμού (80,00% ειδήμονες, 62,50% φορείς), την ενσωμάτωση χώρων κοινωνικής αλληλεπίδρασης όλων των ηλικιών (76,67% ειδήμονες, 75,00% φορείς), χώρων πρασίνου και στοιχείων νερού (96,67% ειδήμονες, 56,25% φορείς). Στις ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής για την ενσωμάτωση της τεχνολογικής ευφυΐας οι ειδήμονες τάσσονται υπέρ των συστημάτων παραγωγής ενέργειας (92,86%), ενώ οι φορείς των συστημάτων συλλογής, ανακύκλωσης και αποθήκευσης νερού (100%). Τα συστήματα μεταβολής ιδιοτήτων αποτελούν από κοινού την μειοψηφούσα επιλογή (53,57% ειδήμονες, 69,23% φορείς).

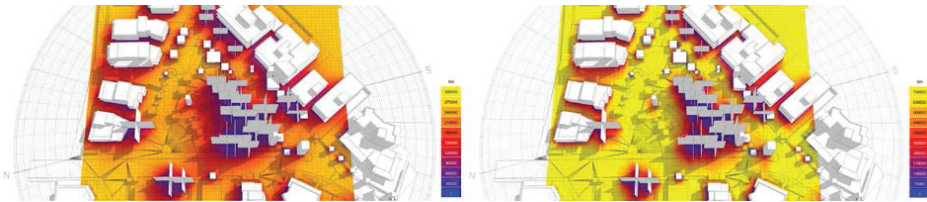
Τα αποτελέσματα των τιμών του δείκτη PMV μέσω του προγράμματος RayMan, συνοψίζονται στα εξής. Την ψυχρή περίοδο (Οκτώβριο-Μάρτιο) οι χρήστες μικρότερης και μέσης ηλικίας τοποθετούνται ως επί το πλείστον σε τιμές θερμικής άνεσης. Οι ηλικιωμένοι εντάσσονται πλειοψηφικά σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης (πολύ ψύχος και ψύχος). Τη θερμή περίοδο (Απρίλιο-Σεπτέμβριο) οι χρήστες μικρότερης ηλικίας βρίσκονται πλειοψηφικά σε συνθήκες θερμικής άνεσης (θερμικά ουδέτερη ζώνη,

μερικώς σε ελαφριά ζέση και σε αρκετά θερμή ζώνη). Έφηβοι και ενήλικες εντάσσονται σε θερμικά ουδέτερη ζώνη. Οι ηλικιωμένοι σε θερμικά ουδέτερη ζώνη και σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης.

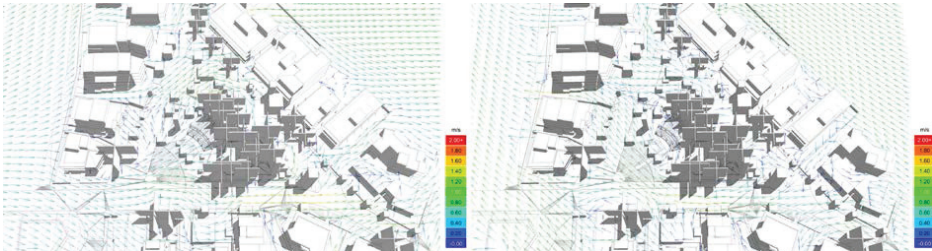
Τα αποτελέσματα του Ecotect Analysis συνοψίζονται στα εξής. Τα διαγράμματα εμβέλειας σκιών δεικνύουν ότι τα επαρκώς σκιασμένα τμήματα της πλατείας συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες πυκνώσεις χρηστών (θέρος) και οι ετήσιες εναλλαγές ηλιασμού/ηλιοπροστασίας στις περιοχές ψηλών φυτεύσεων δημιουργούν τοπικά συνθήκες θερμικής άνεσης. Τα διαγράμματα ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας δεικνύουν την ανάγκη αντικατάστασης συμβατικών υλικών διαμόρφωσης για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης. Τα διαγράμματα ανεμοροής καταγράφουν εντός/πéριξ της πλατείας μέτρια ένταση ανέμου συστηματικά και συμβολή των βόρειων και νοτιοδυτικών ανέμων στον καλό αερισμό και στη διαφυγή των ρύπων, τοπικά. Τα στερεογραφικά διαγράμματα καταγράφουν την ανάγκη βελτίωσης της οπτικής άνεσης στην παιδική χαρά μέσω διεύρυνσης του πεδίου όρασης, της ανεμπόδισης θέας προς το θόλο του ουρανού και της διείσδυσης του ηλιακού φωτός στο επίπεδο του εδάφους. Στην υπόλοιπη πλατεία διασφαλίζεται οπτική άνεση, αλλά συναρτίζεται των εναλλαγών των εποχιακών και χρονικών κύκλων, απαιτείται διαχείριση για την αποφυγή της θάμβωσης.



Εικόνα 2: Διαγράμματα εμβέλειας σκιών χειμερινό ηλιοστάσιο, εαρινή ισημερία, θερινό ηλιοστάσιο.



Εικόνα 3: Διαγράμματα ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας χειμώνα, θέρος.



Εικόνα 4: Διαγράμματα ανεμοροής επικρατούντων βόρειων, νοτιοδυτικών ανέμων.

3.2. Συγκριτική θεώρηση αποτελεσμάτων εναλλακτικών σεναρίων αιφορικών

Αξιολογούνται μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης τρία εναλλακτικά σενάρια αιφορικών παρεμβάσεων μέσω τεχνολογικής ευφυΐας. Μεθοδολογικά ακολουθείται κοινή σχεδιαστική βάση αρχιτεκτονικής επίλυσης. Τα σενάρια διαφοροποιούνται λόγω εξελικτικής ενσωμάτωσης τεχνολογικής ευφυΐας, μέσω διαδοχικής μετάβασης από τα υλικά εξελιγμένων ιδιοτήτων, στα τεχνολογικά ευφυή υλικά/δομές μεταβολής ιδιοτήτων, στα διασυνδεδεμένα τεχνολογικά ευφυή συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Το πρώτο σενάριο αφορά αιφορικές παρεμβάσεις σχεδιασμού μέσω τεχνολογικής ευφυΐας “ψυχρών υλικών” (κυβόλιθοι/πλάκες με διάκενα, ανακυκλωμένη ξυλεία, ανακυκλωμένη πορώδης ασφαλτος, πατημένο χώμα με σταθεροποιητή, κ.ά.), εξελιγμένων ιδιοτήτων (υψηλός δείκτης ανακλαστικότητας ηλιακής ακτινοβολίας, εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας, υδατοπερατότητας, ενεργειακής αποδοτικότητας, ανθεκτικότητας, κ.ά.). Συνδυαστικά τοποθετούνται ενεργειακά αποδοτικότερα φωτιστικά σώματα, εκσυγχρονίζεται το σύστημα άρδευσης, εφαρμόζεται σύστημα βυθιζόμενων κάδων συμπίεσης απορριμμάτων/ανακύκλωσης, μονάδων προδιαλογής βιοαποβλήτων και συλλογής περιττωμάτων κατοικίδιων. Διαμορφώνεται υπόγειο σύστημα αναερόβιας κομποστοποίησης

“πράσινων αποβλήτων” άμεσης/ευρύτερης περιοχής. Οργανώνονται νέες ενδημικές φυτεύσεις σε κατάλληλους συνδυασμούς με τις υφιστάμενες μέσω συνθετικής και ειδολογικής ένταξης.

Το δεύτερο σενάριο επικεντρώνεται σε αιφορικές παρεμβάσεις τεχνολογικής ευφυΐας μεταβολής ιδιοτήτων (θερμοχρωμικές βαφές/επιχρίσματα/επιστρώσεις, φωτοκαταλυτικές αυτοκαθαριζόμενες βαφές/επιστρώσεις/υφάσματα). Εστιάζει στη μετάβαση από τις στατικές ιδιότητες υλικών/δομών/συστημάτων στις τεχνολογικά ευφυείς συμπεριφορές τους, ανταποκρινόμενα σε χρονικές/κλιματικές/εποχιακές εναλλαγές. Προσθετικά στις παρεμβάσεις του πρώτου σεναρίου ενσωματώνονται στα φωτιστικά σώματα τοπικοί χρονοδιακόπτες (αζιμούθιου ή εφεδρείας).

Το τρίτο σενάριο επικεντρώνεται σε αιφορικές παρεμβάσεις διασυνδεδεμένης τεχνολογικής ευφυΐας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (“φωτοβολταϊκός κισός” [16], “biophotonvoltaic” [17], [18], βυθιζόμενοι κάδοι ευφυούς διαχείρισης απορριμμάτων/ανακύκλωσης τροφοδοσίας με φωτοβολταϊκά στοιχεία, πιεζοκεραμικές πολυκρυσταλλικές πλάκες ενσωματωμένων αισθητήρων/ενεργοποιητών). Εστιάζει στα ευφυή συστήματα με αισθητήρες/ενεργοποιητές/επεξεργαστές ελέγχου, ενταγμένα σε δίκτυο και διασυνδεδεμένα με κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Προσαρτάται διασυνδεδεμένο σύστημα αισθητήρων κίνησης στα φωτιστικά σώματα, εφαρμόζονται φωτοβόλα υλικά/εκπομπής φωτός και πιλοτικά διασυνδεδεμένοι αισθητήρες ευφυούς διαχείρισης δημόσιας στάθμευσης (smart parking).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα εφαρμογής των τριών εναλλακτικών σεναρίων προκύπτουν τα κάτωθι:

α) Χωρική διάσταση: η κοινή αρχιτεκτονική επίλυση προάγει τη διαχείριση της “πλατείας γειτονιάς” ως κόμβο ευρύτερης δικτύωσης με πόλους ενδιαφέροντος/οικοσυστήματα/υπαίθριους χώρους/ υπηρεσίες/εκπαίδευση/δίκτυο κυκλοφορίας. Αναδεικνύει δυναμικές συνδεσιμότητας με τον αστικό ιστό, ποιοτικά χαρακτηριστικά τοπικής κλίμακας και φυσιολογικής γειτονιάς. Προάγει αρχές βιώσιμης κινητικότητας μέσω ποδηλατοδρόμων/δρόμων ήπιας κυκλοφορίας/διαχείρισης διακριτών ροών πεζών/οχημάτων και διασφάλισης ασφαλούς/ανεμπόδιστης προσβασιμότητας. Αναβαθμίζει αισθητικά και λειτουργικά τη πλατεία Θράκης μέσω νέων πεδίων δραστηριότητας, εκσυγχρονισμού/επέκτασης υφιστάμενων δικτύων υποδομών, αιφορικής διαχείρισης υλικών/δομών/συστημάτων, εναλλακτικών διαδικασιών διαχείρισης στοιχείων νερού (επανάχρηση/αποθήκευση/ανακύκλωση), ανάδειξης υφιστάμενων φυτεύσεων και εμπλουτισμού τους με είδη ενδημικής βλάστησης, επιλεγμένα με κριτήρια οικολογικά, λειτουργικά, οπτικής και αισθητικής σύνδεσης με το τοπίο.

β) Οικονομική/Πολιτική διάσταση: από το πρώτο στο τρίτο σενάριο αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος, το οποίο εξισορροπείται σε βάθος χρόνου, συνυπολογίζοντας τα αυξημένα οφέλη από τη μείωση του κόστους λειτουργίας (μειωμένα τρέχοντα κόσθη/ενεργειακό κόστος/κόστος κατανάλωσης), συντήρησης (αυξημένη ανθεκτικότητα/αποδοτικότητα/εξοικονόμηση πόρων) και κύκλου ζωής υλικών/ κατασκευών.

γ) Περιβαλλοντική διάσταση/Συνθήκες άνεσης: από το πρώτο στο τρίτο σενάριο βελτιώνονται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (μείωση “αποτυπώματος άνθρακα”, διαχείριση φυσικών πόρων, ενδημικής βλάστησης, βιοποικιλότητας), οι συνθήκες θερμικής (ελεγχόμενη μεταβολή επιφανειακών θερμοκρασιών) οπτικής (αποφυγή θάμβωσης, θελκτικά οπτικά ερεθίσματα συναρτήση χρονικών/κλιματικών/εποχιακών εναλλαγών) και ακουστικής άνεσης.

δ) Τεχνολογική/ενεργειακή διάσταση: από το πρώτο στο τρίτο σενάριο βελτιώνεται ο ενεργειακός κύκλος ζωής υλικών/δομών/συστημάτων, τα μέσα διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας.

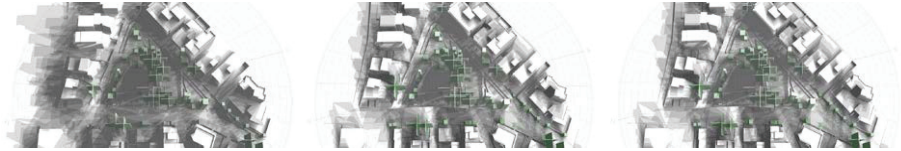
ε) Διάσταση ποιότητας ζωής: από το πρώτο στο τρίτο σενάριο αναβαθμίζονται οι συνθήκες διαβίωσης και ποιότητας ζωής (βελτιωμένα αισθητικό/οικονομικό/ενεργειακό/περιβαλλοντικό αποτύπωμα).

στ) Κοινωνική διάσταση: μετατρέπεται σε πυρήνα κοινωνικής ζωής για το σύνολο των χρηστών, μέσω επανασχεδιασμού με αντιληπτές/οικειοποιήσιμες/θελκτικές/προσβάσιμες/ασφαλείς επιμέρους ενότητες δραστηριοτήτων. Ενισχύεται η κοινωνική ισότητα/δικαιοσύνη/συνοχή. Η τεχνολογική ευφυΐα που ενσωματώνεται καθίσταται εύκολα αντιληπτή και οικειοποιήσιμη από το σύνολο των χρηστών. Από το πρώτο στο τρίτο σενάριο τα πολυειδή, ευφυή και αλληλοσυμπληρούμενα δυναμικά πεδία δραστηριοτήτων θέτουν τους χρήστες ως ενεργούς “μετασχηματιστές” του αστικού χώρου, ενισχύοντας διαδραστικές σχέσεις, κοινωνικοποίηση και ενεργή συμμετοχικότητα.

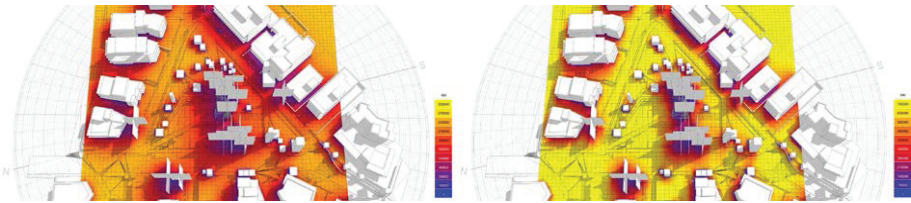
Από τα αποτελέσματα του δείκτη PMV μέσω του RayMan, καταγράφεται στις δύο περιόδους μικρή βελτίωση (~0,1) των συνθηκών θερμικής άνεσης όλων των χρηστών, με μεγαλύτερο εύρος τη θερμή περίοδο. Η βελτίωση διαφοροποιείται ανά χρήστη. Οι ηλικιωμένοι δέχονται τη μεγαλύτερη επίδραση.

Τα αποτελέσματα του Ecotect Analysis δεικνύουν τις βελτιώσεις των συνθηκών οπτικής άνεσης μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης της κόμης των ψηλών δένδρων και του αερισμού και της διαφυγής των ρύπων με την απομάκρυνση μη υγιών φυτεύσεων των περιμετρικών παρτεριών, εξασφαλίζοντας

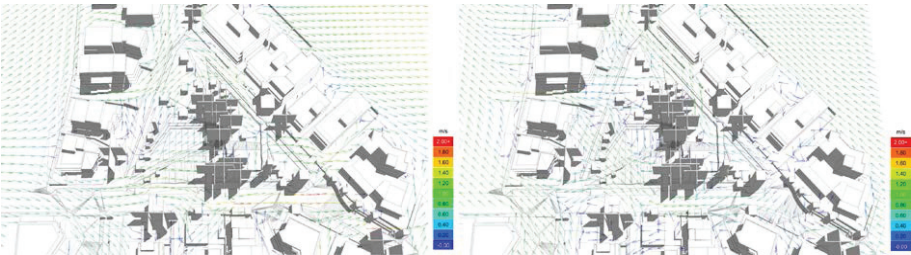
ανεμπόδιστη ανεμοροή. Αξιοποιείται το ανεμολογικό δυναμικό στη βελτίωση θερμικής άνεσης μέσω διαχείρισης/αναδιάταξης των λειτουργικών ενότητων.



Εικόνα 6: Διαγράμματα εμβέλειας σκίων χειμερινό ηλιοστάσιο, εαρινή ισημερία, θερινό ηλιοστάσιο.



Εικόνα 7: Διαγράμματα ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας χειμώνα, θέρους.



Εικόνα 8: Διαγράμματα ανεμοροής επικρατούντων βόρειων, νοτιοδυτικών ανέμων.

Το τελικό παραγόμενο αποτέλεσμα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης των εναλλακτικών σεναρίων μέσω της μεθόδου ELECTRE III, βάσει των πολυειδών κριτηρίων που έχουν θεθεί, δεικνύει την κατάταξη στην πρώτη θέση του πρώτου σεναρίου, αιφροτικός σχεδιασμός χωρίς διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα. Εν συνεχεία, υπερέχει το τρίτο εναλλακτικό σενάριο, αιφροτικός σχεδιασμός με διασυνδεδεμένη τεχνολογική ευφυΐα παραγωγής ενέργειας, έναντι του δεύτερου σεναρίου, αιφροτικός σχεδιασμός με τεχνολογική ευφυΐα μεταβολής ιδιότητας. Τελευταίο στην ιεράρχηση είναι το μηδενικό σενάριο, ο υφιστάμενος συμβατικός σχεδιασμός, καθώς αντικατοπτρίζει την ισχύουσα συνθήκη πεπτατημένων σχεδιαστικών πρακτικών που χρήζουν βελτιώσεων.

Πίνακας 5: Αποτέλεσμα πολυκριτηριακής αξιολόγησης μέσω ELECTRE III

	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
Σενάρια	Θεατικότητα	Διάδραση	Συμμετοχή	Τοπίο	Μικροκλίμα/ Συνθήκες Άνεσης	Θερμική Άνεση Rayman	Κόστος Επένδυσης	Αποτύπωμα άνθρακα	Ενεργειακή αποδοτικότητα	Ανεκτικότητα	ΣΔΔΕ	Συμμετοχική πολιτική
0	3.00	3.21	2.09	3.16	3.50	0.00	1.30	0.00	1.00	1.00	1.50	0.73
1	3.50	3.80	2.20	3.50	4.00	0.10	0.60	0.25	2.00	2.00	2.00	0.75
2	4.00	4.00	3.00	3.80	4.20	0.10	0.20	0.50	3.00	1.40	1.00	0.8
3	4.50	4.80	3.80	4.00	4.40	0.10	0.00	0.75	4.00	1.20	0.00	0.85
Βάρη	0.07895	0.10526	0.07895	0.10526	0.10526	0.10526	0.05263	0.07895	0.10526	0.10526	0.02632	0.05263

Σειρά κατάταξης	Εναλλακτικά σενάρια αιφρορικών παρεμβάσεων τεχνολογικής ευφυΐας
1	Σενάριο 1 : Αιφρορικός σχεδιασμός χωρίς διασυνδεμένη τεχνολογική ευφυΐα
2	Σενάριο 3 : Αιφρορικός σχεδιασμός με διασυνδεμένη τεχνολογική ευφυΐα
3	Σενάριο 2 : Αιφρορικός σχεδιασμός με τεχνολογική ευφυΐα μεταβολής ιδιοτήτων
4	Σενάριο 0 : Υφιστάμενος συμβατικός σχεδιασμός της πλατείας

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την πολυκριτηριακή ανάλυση, βάσει των εξεταζόμενων κριτηρίων, διαπιστώνεται ότι η πολιτική στρατηγική, η διευρυμένη οικονομική ύφεση, οι επικρατούσες πρακτικές αιφρορικού σχεδιασμού και τεχνολογικής ευφυΐας καθορίζουν την υπεροχή του πρώτου σεναρίου (αιφρορικός σχεδιασμός χωρίς διασυνδεμένη τεχνολογική ευφυΐα). Αποτελεί την αναμενόμενη επιλογή, την πιο πιθανή τάση αιφρορικών παρεμβάσεων, με δεδομένα εφικτότητας και ευκολίας υλοποίησης. Αποτελεί μία οικονομικά ελκυστική επιλογή, όχι όμως και την πιο αποδοτική. Το τρίτο σενάριο επικεντρώνεται στην παραγωγή εύρηστων μορφών ενέργειας μέσω διασυνδεμένης τεχνολογικής ευφυΐας και υπερέρχει του δεύτερου σεναρίου που εστιάζει στη μετάβαση από τις στατικές ιδιότητες υλικών/δομών/συστημάτων στις τεχνολογικά ευφυείς συμπεριφορές, μεταβολής ιδιοτήτων χωρίς διασύνδεση. Οι σχέσεις υπεροχής του παραγόμενου αποτελέσματος αποκαλύπτουν τη συνολική προστιθέμενη αξία της τεχνολογικής ευφυΐας στην ενεργειακή διαχείριση και στον αιφρορικό σχεδιασμό και αποτυπώνουν μία τάση υπεροχής των ευφυών διασυνδεμένων υλικών/δομών/συστημάτων.

Εστιάζοντας στο ότι οι παρεμβάσεις τεχνολογικής ευφυΐας χαιρούν αποδοχής από θαμνές και ιθύνοντες, η πολυκριτηριακή αξιολόγηση δεικνύει ότι αν εξέλειπαν οικονομικοί λόγοι και πεπατημένες πρακτικές τελεολογικού σχεδιασμού της ελληνικής πραγματικότητας, που λειτούργησαν και λειτουργούν ως τροχοπέδη στην ενσωμάτωση τεχνολογικής ευφυΐας, το τρίτο εναλλακτικό σενάριο δύναται να αποτελούσε τη βέλτιστη επιλογή.

Εκ των αποτελεσμάτων, οι τεχνολογικά ευφυείς λύσεις συνάδουν στη μείωση του κόστους λειτουργίας (μειωμένο ενεργειακό κόστος, κόστος αποκομιδής απορριμμάτων κ.ά.), του κόστους συντήρησης (αυξημένη ανθεκτικότητα, αποδοτικότητα, εξοικονόμηση πόρων κ.ά.) και του κόστους κύκλου ζωής υλικών/κατασκευών, τα οποία εξισορροπούν το αρχικό κατασκευαστικό κόστος σε βάθος χρόνου. Διαμορφώνουν καλύτερες προϋποθέσεις διαχείρισης της ενεργειακής κατανάλωσης και βελτιωμένης ενεργειακής αποδοτικότητας. Δημιουργούν ιδιαίτερα πολυειδή ερεθίσματα και προκλήσεις, καθιστώντας ιδιαίτερα θελκτικό το δημόσιο χώρο, ως ζωντανό πυρήνα ενεργητικής κοινωνικής αλληλεπίδρασης, που προάγει τη διάδραση των χρηστών με το αστικό τοπίο και αυξάνει τη συμμετοχή τους στη διαχείριση ενός δυναμικού πεδίου δραστηριοτήτων.

Διαπιστώνεται ότι ακόμα και αν η βαθμολόγηση της σπουδαιότητας των κριτηρίων μεταβληθεί, καθώς από τα οριζόμενα της πολυκριτηριακής μεθόδου είναι σε μεγάλο βαθμό υποκειμενική και εξαρτάται από τις καταγραφείσες απόψεις, υπάρχουν εναλλακτικές αιφρορικών παρεμβάσεων βασισμένες στην τεχνολογική ευφυΐα, οι οποίες δύναται να ενταχθούν σε μία “πλατεία γειτονιάς” και να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης, οικονομικού, ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος, δημόσιας υγείας και ποιότητας ζωής, εν γένει.

Εν κατακλείδι, τα ως άνω αναφερόμενα δημιουργούν ένα γόνιμο έδαφος για την αποτελεσματική προσαρμογή και ενίσχυση αυτού καθαυτού του νοήματος, του ρόλου και της ταυτότητας της “πλατείας γειτονιάς”, ως πεδίο χωροποίησης της κοινωνικής εμπειρίας, ποιοτικής αναβάθμισης και βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του τόπου μέσα από ενεργειακά ευφυείς, ωφέλιμες και αισθητικά αποδεκτές αιφρορικές παρεμβάσεις. Τα οφέλη του αιφρορικού σχεδιασμού μέσω τεχνολογική ευφυΐας είναι πολλαπλά, σε οικονομικό, αισθητικό, χωροκοινωνικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Στη συνέργεια αστικού-ευφυούς διασυνδεμένου ψηφιακού τοπίου δεν υπάρχουν τελεολογικά προκαθορισμένα λειτουργικά, μορφολογικά και δομικά αποτελέσματα. Η αναγέννηση του ενδιαφέροντος για ποιοτικούς αστικούς δημόσιους υπαίθριους χώρους πηγάζει από δυνατότητες μεταβολής και δυναμικές συμπεριφορές διαχείρισης, από τους χρήστες για τους χρήστες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Harvey, D., 1989, “The Condition of Postmodernity,” Basil Blackwell, Oxford & USA, p.273.

- [2] Schramm, L., 2014, "Nano and Microtechnology from A-Z," Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, KGaA, Germany.
- [3] Addington, D. & Schodek, D., 2005, "Smart Materials and Technologies: for the Architecture and Design Professions", Architectural Press, Boston.
- [4] TOTEE 20701-1, 2012, "Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης," ΤΕΕ, Β' έκδοση, Αθήνα.
- [5] Hasson, D., and Arnetz, B., 2005, "Validation and Findings Comparing VAS vs. Likert Scales for Psychosocial Measurements," International Electronic Journal of Health Education, Vol.8, pp.178-192.
- [6] Spooren, P., Mortelmans, D., and Denekens, J., 2007, "Student Evaluation of Teaching Quality in Higher Education: Development of an Instrument Based on 10 Likert-Scales," Assessment & Evaluation in Higher Education, Vol. 32(6), pp.667-679.
- [7] Μπίρη, Μ., 2017, "Αστικό και Ευφυές Διασυνδεδεμένο Ψηφιακό Τοπίο: Διάδραση-Ανθεκτικότητα- Ενεργειακή Αποδοτικότητα, Εστιάζοντας στον Αειφορικό Σχεδιασμό της Πλατείας," Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων (ΠΣΠ), Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, ΕΑΠ.
- [8] Djongyang, N., Tchinda, R., and Njomo, D., 2010, "Thermal Comfort: A Review Paper," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14(9), pp. 2626-2640.
- [9] ANSI/ASHRAE, 2004, Standard 55, "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy,".
- [10] Lin, T.-P., Matzarakis, A., Hwand, R.-L., 2010, "Shading Effect on Long-term Outdoor Thermal Comfort," Building and Environment 45, pp. 213-211.
- [11] Matzarakis, A., Rutz F. and Mayer H. ,2007, "Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments-Application of the RayMan model," International Journal of Biometeorology, Vol.51, pp.323-334.
- [12] Roy, B., 1991, "The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods," Theory and Decision, Vol.31, pp.49-73.
- [13] Roy, B. and Vincke, P., 1981, "Multicriteria Analysis: Survey and New Directions," European Journal of Operational Research, Vol.8, pp.207-218.
- [14] Jablonsky, J., 2014, "MS Excel Based Software Support Tools for Decision Problems with Multiple Criteria," Procedia Economics and Finance, Vol.12, pp.251-258.
- [15] Jablonsky, J., 2009, "Software Support for Multiple Criteria Decision Making Problems", Management Information Systems, Vol.4(2), pp.29-34.
- [16] Cochran, S, 2005, "Solar Ivy", Grow, SMIT, Pratt Institute.
- [17] Driver, A. and Bombelli, P., 2011 "Biophotovoltaics Energy from Algae", Catalyst, Vol.21(4), pp.13-15.
- [18] McCormick, A.J., Bombelli, P., Scott A.M., Phillips, A.J., Smith A.G., Fisher A.C., Howe C.J., 2011, "Photosynthetic Biofilms in Pure Culture Harness Solar Energy in a Mediatorless Biophotovoltaic Cell (BPV) System", Energy & Environmental Science, Vol.4(11), pp. 4699-4709.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Δρ. Κλεοπάτρα Πετρουτσάτου

Επίκουρη Καθηγήτρια

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

e-mail: kpetrout@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας παραχωρούν σιγά σιγά το μερίδιό τους στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω της εξάντλησης των συμβατικών πηγών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αυτές έχουν. Οι επενδύσεις σε νέες μορφές ενέργειας είναι επιτακτικές και αποτελούν ένα πολυδιάστατο εγχείρημα με ένα φάσμα επιλογών, κριτηρίων αξιολόγησης και πολλών λύσεων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι υπεύθυνοι λήψης απόφασης απόφασης αναπτύσσουν νέες μεθόδους και νέα μοντέλα με δυνατότητα ενσωμάτωσης των παραπάνω ιδιαιτεροτήτων και αξιολόγησης των επιλογών, ώστε να είναι σε θέση να οδηγούνται στην επιθυμητή λύση εξετάζοντας την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Το μέγεθος της αβεβαιότητας που διακρίνει μία επενδυτική απόφαση εξαρτάται από το είδος της επένδυσης και τα γενικότερα χαρακτηριστικά της. Η απόφαση μπορεί να ληφθεί υπό το πρίσμα πολλαπλών κριτηρίων. Αυτή η διαδικασία απαιτεί την επεξεργασία των ίδιων των κριτηρίων, καθώς και την αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών για κάθε επεξεργασμένο κριτήριο. Η παρούσα εργασία σκοπεύει να παρουσιάσει τα πιο συχνά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που εφαρμόζονται στον ενεργειακό τομέα και να αναπτύξει εν συντομία τις βασικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία αξιολόγησης επένδυσης ενεργειακού έργου με δύο παραδείγματα εφαρμογής.

Λέξεις Κλειδιά: Ενέργεια, Αξιολόγηση Επένδυσης, Πολυκριτήρια Ανάλυση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα αποτελεί το δομικό λίθο για την κάλυψη των αναγκών μιας κοινωνίας. Μέχρι πριν από κάποιες δεκαετίες το ενεργειακό πρόβλημα έβρισκε τη λύση του μέσω της διαθεσιμότητας του χρήματος και της τεχνολογίας. Το σκηνικό όμως άλλαξε η ραγδαία αύξηση των τιμών ενέργειας, η εξάντληση των συμβατικών ενεργειακών πόρων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν μερικούς μόνο από τους λόγους για τους οποίους η επίλυση του ενεργειακού προβλήματος άρχισε να γίνεται πιο σύνθετη. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας παραχωρούν σιγά σιγά μερίδιο του μονοπωλίου τους στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το ενεργειακό πρόβλημα παύει να επιλύεται πλέον με παραδοσιακές μεθόδους και εργαλεία. Γίνεται πολυδιάστατο με ευρύ φάσμα επιλογών, κριτηρίων αξιολόγησης και πολλών λύσεων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι υπεύθυνοι λήψης απόφασης αναπτύσσουν νέες μεθόδους και νέα μοντέλα με δυνατότητα ενσωμάτωσης των παραπάνω ιδιαίτεροτήτων και αξιολόγησης των επιλογών, ώστε να είναι σε θέση να οδηγούνται στην επιθυμητή λύση εξετάζοντας την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Ο βαθμός της αβεβαιότητας μπορεί να ποικίλει από την «τέλεια γνώση», όπου όλες οι μεταβλητές της επένδυσης είναι γνωστές, έως την πλήρη αβεβαιότητα. Λήψη απόφασης μπορεί να θεωρηθεί κάθε διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή μιας εναλλακτικής λύσης από μία ομάδα εναλλακτικών σεναρίων. Αυτή η διαδικασία απαιτεί την επεξεργασία των ίδιων των κριτηρίων, καθώς και την αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών για κάθε επεξεργασμένο κριτήριο. Στο τέλος θα πρέπει να δημιουργηθεί μία συγκεντρωτική εκτίμηση για κάθε εναλλακτική λύση, ώστε να επιτευχθεί η σχετική βαθμολόγηση ή η σειρά κατάταξης των εναλλακτικών.

Είναι σημαντικό να γίνει σαφές εξαρχής ότι όπως σε όλες τις επενδύσεις έτσι και στις επενδύσεις σε έργα ενέργειας δύο είναι οι βασικές διαστάσεις που εξετάζονται: η οικονομική αξιολόγηση και η κοινωνική αξιολόγηση. Η οικονομική αξιολόγηση βασίζεται στην χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης και με βάση χρηματοοικονομικούς δείκτες κρίνεται η οικονομική βιωσιμότητά της και η συγκριτική επιλογή από άλλες εναλλακτικές. Η κοινωνική αξιολόγηση βασίζεται στην ανάλυση κόστους – ωφελειών, η οποία επιδιώκει να αποδώσει οικονομική διάσταση σε όλες τις παραμέτρους ενός έργου (περιβαλλοντικές, τεχνικές, κοινωνικές). Η ανάλυση αυτή στοχεύει στην αξιολόγηση της συμβολής της επένδυσης στην οικονομική ευημερία μιας περιφέρειας ή και ολόκληρης της χώρας.

2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η αξιολόγηση επενδύσεων είναι μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία, η οποία από τη φύση της εμπειρεύει ένα μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας και ρίσκου. Η αξιολόγηση μιας επένδυσης συνολικά βασίζεται στη βαθιά κατανόηση της εταιρείας και του περιβάλλοντός της (αγορά) καθώς και σε θέματα στρατηγικής που η επιχείρηση, με υποκειμενικό τρόπο, θέτει. Η χρηματοοικονομική αξιολόγηση αποτελεί ένα μέρος της όλης διαδικασίας, που περιστρέφεται γύρω από την έννοια των ταμειακών ροών της επένδυσης.

Περιλαμβάνει τις εξής δύο διαδικασίες:

- Τον **εντοπισμό όλων των εσόδων (εισροών) και εξόδων (εκροών)**, που σχετίζονται με τη σχεδιαζόμενη επένδυση (cash flow analysis).
- Τη **χρήση μεθόδων και κριτηρίων**, με βάση τα οποία οι παραπάνω εισροές και εκροές να μπορούν να αξιολογούνται (capital budgeting decision methods).

Η πρώτη διαδικασία του εντοπισμού των αναμενόμενων εσόδων και εξόδων της επένδυσης είναι ασφαλώς η περισσότερο δύσκολη, αυτή που εμπειρεύει τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα για τα συμπεράσματα της αξιολόγησης. Στη διαδικασία αυτή καταρτίζονται όλες οι παραδοχές για την επένδυση πράγμα ιδιαίτερα δύσκολο και με μεγάλη αβεβαιότητα.

Η δεύτερη διαδικασία έχει μεθοδολογικό – αναλυτικό χαρακτήρα που σκοπό έχει την επεξεργασία των δεδομένων και των παραδοχών της πρώτης φάσης, ώστε η λήψη απόφασης να βασίζεται σε διάφανους εύληπτους δείκτες. Η μόνη βασική παραδοχή εδώ είναι η εξέλιξη του κόστους κεφαλαίου (cost of capital) μέσα στο χρόνο.

Το πλαίσιο της ανάλυσης αφορά είτε:

- την αποδοχή ή απόρριψη μιας δεδομένης επένδυσης, είτε

- την επιλογή ανάμεσα σε περισσότερες.

Στην πρώτη περίπτωση, η επιλογή ή η απόρριψη επιλέγεται με βάση έναν «καλό» δείκτη αξιολόγησης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση με βάση τον «καλύτερο» δείκτη, που προκύπτει μέσα από μία συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών της κάθε επένδυσης ξεχωριστά.

Ιστορικά έχουν αναπτυχθεί έξι μέθοδοι για την επεξεργασία δεδομένων ταμειακών ροών (cash flows). Οι μέθοδοι οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα. Δεν πρόκειται, δηλαδή, για εναλλακτικές προσεγγίσεις του ίδιου δείκτη. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι παρακάτω:

- Η περίοδος αποπληρωμής των επενδυμένων χρημάτων (payback period – PP)
- Απόδοση επένδυσης (return on investment - ROI)
- Η μέθοδος του ισοδύναμου ετήσιου κόστους ή ετήσιας χρηματοροής (equivalent annual net cash flow)
- Η μέθοδος της καθαρής παρούσας αξίας (net present value – NPV)
- Ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης κεφαλαίου (internal rate of return – IRR)
- Ο δείκτης κερδοφορίας (profitability index – PI).

Οι δύο πρώτες αναφέρονται ως «απλουστευμένες» ή «ατελείς», δεδομένου ότι δεν λαμβάνουν υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος και δεν εξετάζουν ολόκληρη τη χρονική διάρκεια της λειτουργικής ζωής της επένδυσης, και επομένως όλες τις ετήσιες χρηματοροές που προβλέπονται να πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτή. Οι υπόλοιπες χαρακτηρίζονται ως «ακριβείς» επειδή λαμβάνουν υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος και ονομάζονται *προεξοφλημένων καθαρών χρηματοροών* (discounted net cash flow methods). Χαρακτηριστικό των «ακριβών» αυτών μεθόδων είναι ότι το ελάχιστο αναμενόμενο κέρδος εκφράζεται με το επιτόκιο απόδοσης των κεφαλαίων που επενδύθηκαν. Το ελάχιστο αναμενόμενο κέρδος, το οποίο καθορίζεται από το επιτόκιο απόδοσης, μπορεί να χαρακτηριστεί ως κόστος του κεφαλαίου για την περίοδο της επένδυσής του. Η χρονική αξία του χρήματος είναι η διαφορά που καλείται κάποιος να πληρώσει σήμερα για να δανειστεί χρήματα τα οποία θα επιστρέψει κάποια στιγμή στο μέλλον [1]. Το *ενοίκιο* για τον δανεισμό των χρημάτων καλείται επιτόκιο (interest). Το *επιτόκιο* περιλαμβάνει το κέρδος και το ρίσκο του δανειστή στα χρήματα που δανείζει. Το κόστος κεφαλαίου είναι λοιπόν μία σύνθετη έννοια που επηρεάζεται τόσο από την απόδοση των κεφαλαίων όσο και από το ρίσκο που είναι ενσωματωμένο στην προσδοκώμενη απόδοσή τους. Στην πράξη ως κόστος κεφαλαίου χρησιμοποιείται το επιτόκιο τραπεζικού δανεισμού γεγονός που αποτελεί μία απλούστευση, η οποία ανάλογα με την κεφαλαιακή διάρθρωση της εταιρείας μπορεί να απέχει λίγο ή περισσότερο από την πραγματικότητα.

2.1. Δείκτες χρηματοοικονομικής αξιολόγησης

Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι χρηματοοικονομικής αξιολόγησης ενός ενεργειακού έργου είναι: α) η μέθοδος της καθαρής παρούσας αξίας – NPV και β) ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης κεφαλαίου – IRR. Με την NPV προσδιορίζονται οι καθαρές ετήσιες χρηματοροές κάθε επένδυσης και στη συνέχεια ανάγονται στο χρόνο «μηδέν» με ένα προκαθορισμένο επιτόκιο (το κόστος κεφαλαίου). Στη συνέχεια αθροίζονται αλγεβρικά τα «ανηγμένα» αυτά ποσά και προκύπτει η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης. Αν η αξία αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή που έχει τεθεί από τους επενδυτές, αποφασίζεται η υλοποίηση της επένδυσης. Διαφορετικά αυτή απορρίπτεται. Για την περίπτωση των αμοιβαίως αποκλειόμενων επενδύσεων, προκρίνεται αυτή που εμφανίζει τη μεγαλύτερη ΚΠΑ, ενώ επενδύσεις με αρνητικές ΚΠΑ απορρίπτονται. Η μέθοδος του IRR αρχικά φαίνεται να είναι ισοδύναμη με την παραπάνω προσέγγιση της αναγωγής σε καθαρή παρούσα αξία. Αντί να θεωρείται δεδομένο το κόστος κεφαλαίου και να επιχειρείται η αναγωγή σε παρούσα αξία, αναζητείται εκείνο το κόστος κεφαλαίου που θα καθιστούσε μηδενική την παρούσα αξία της επένδυσης. Η σχέση που μας δίνει τον εσωτερικό ρυθμό απόδοσης (IRR) προκύπτει ως εξής:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1 + IRR)^t} \quad (1)$$

C_t: οι καθαρές ετήσιες χρηματοροές στο τέλος της χρονικής περιόδου t.

Η εύρεση του δείκτη με βάση την προηγούμενη σχέση μπορεί να γίνει μόνο με δοκιμές και όχι αναλυτικά. Με βάση το δείκτη IRR η επένδυση αξιολογείται θετικά αν ο δείκτης προκύπτει μεγαλύτερος από το κόστος του κεφαλαίου. Αντίστοιχα, προκειμένου για εναλλακτικές επενδύσεις προτιμάται η επένδυση με το μεγαλύτερο δείκτη απόδοσης.

3. ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ανάλυσης που ποσοτικοποιούν κοινωνικές παραμέτρους (περιβαλλοντικές, τεχνικές, κοινωνικές) ή αλλιώς τα εξωτερικά κόσθη μίας επένδυσης στον ενεργειακό τομέα είναι:

- Η ανάλυση του κύκλου ζωής (Life cycle analysis – LCA)
- Η ανάλυση κόστους – οφέλους (Cost benefit analysis – CBA) που αφορά σε εξωτερικά κόσθη.

3.1. Δείκτες κοινωνικής αξιολόγησης

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μία διαδικασία που αναλύει και αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους. Προσδιορίζει και ποσοτικοποιεί την ενέργεια, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον και αξιολογεί τις επιπτώσεις των εισροών και εκροών με στόχο τις ευκαιρίες για περιβαλλοντικές βελτιώσεις. Αναφορικά με τη μελέτη ενός προϊόντος εξετάζεται όλη η διαδικασία: η εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, η παραγωγή, η μεταφορά, η διανομή, η χρήση, η επαναχρησιμοποίηση, η συντήρηση, η ανακύκλωση και τελική διάθεση. Η ανάλυση κύκλου ζωής εξετάζει μόνο περιβαλλοντικά θέματα και βρίσκει εφαρμογή στη διαχείριση αποβλήτων, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, γεωθερμία, αιολική ενέργεια (με υπεράκτια και χερσαία πάρκα), βιομάζα, υγροποιημένο φυσικό αέριο, λιγνίτη, πετρέλαιο, άνθρακα, φωτοβολταϊκούς σταθμούς.

Το βασικό μοντέλο LCA αποτελείται από 4 βήματα [2]:

1. Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου ορισμού. Περιγράφεται το προϊόν και σε σύγκριση με εναλλακτικά προϊόντα και καθορίζεται το επίπεδο ανάλυσης που θα διεξαχθεί.
2. Δημιουργία λίστας με όλες τις εισόδους και εξόδους των υπό εξέταση προϊόντων.
3. Αξιολόγηση της σημασίας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την ανάλυση. Τα δεδομένα που εξάγονται ταξινομούνται και μετατρέπονται σε κοινές ομάδες ισοδυναμίας για κάθε κατηγορία επιπτώσεων (τοξικότητα στο περιβάλλον ή στον άνθρωπο κλπ), προκειμένου να αθροιστούν και να υπολογιστεί ο δείκτης της κάθε κατηγορίας. Οι υπολογισμοί γίνονται βάσει της σχέσης:

$$S_i = \sum_{j=1}^n (E_j) (e_{ij}) \quad (2)$$

S_i : είναι η βαθμολογία που προκύπτει για την κατηγορία επιπτώσεων i , E_j η έκταση της περιβαλλοντικής παρέμβασης j , e_{ij} ο ισοδύναμος συντελεστής που δείχνει τη συνεισφορά μιας μόνο παρέμβασης j σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων i .

4. Στο τέταρτο βήμα αξιολογούνται τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος και αναλύονται οι δυνατότητες και οι ευκαιρίες που προκύπτουν από την χρήση του κάθε προϊόντος με στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

1. Απλότητα στην εφαρμογή της.
2. Είναι εφικτή η ποσοτικοποίηση όλων των εκπομπών σε γη, νερό και αέρα.
3. Είναι δυνατή η αξιολόγηση όλων των επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο οικοσύστημα.
4. Σύγκριση διαφορετικών σεναρίων.

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

1. Η εφαρμογή της μπορεί να καταστεί χρονοβόρα.
2. Όσα και σεναρία να εξεταστούν υπάρχει χώρος και για περισσότερα.
3. Οι παραδοχές (π.χ. πηγές δεδομένων, κριτήρια αξιολόγησης επιπτώσεων και απόδοσης βαρών) που έγιναν για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι υποκειμενικές.
4. Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων σε οικοσυστήματα είναι δύσκολη και πολλές φορές ανέφικτη.

Η ανάλυση κόστους – ωφελειών (λόγος B/C) αποτελεί μία από τις ευρέως τεχνικές αξιολόγησης επενδύσεων, η οποία προτάθηκε για πρώτη φορά το 1808 στις ΗΠΑ σε έργα σχετικά με το νερό και γνώρισε ταχεία άνθηση από το 1950. Με βάση τον οδηγό που έχει εκδώσει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή

για την Ανάλυση Κόστους – Οφέλους [3] για την αξιολόγηση επενδύσεων, έξι βασικά βήματα περιλαμβάνονται σε αυτόν:

1. Στο βήμα αυτό μελετάται το κοινωνικό-οικονομικό-πολιτικό-θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο θα ενταχθεί το έργο. Καθορίζονται οι στόχοι του έργου οι οποίοι θα πρέπει να είναι μετρήσιμοι, με συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και σε αρμονία με την ευρωπαϊκή και εθνική πολιτική.
2. Στο δεύτερο βήμα, αφού έχουν διευκρινιστεί οι στόχοι του έργου, καθορίζεται η αυτάρκεια του έργου (η κατασκευή μισής γέφυρας δεν είναι έργο), ακόμα και αν μέσω της CBA ζητείται η χρηματοδότηση ενός μόνο μέρους από ένα έργο, η CBA θα περιλαμβάνει τα οφέλη και κόστη που προκύπτουν από όλο το έργο. Επίσης, εδώ καθορίζεται ποιος είναι ο ιδιοκτήτης του έργου.
3. Εδώ περιλαμβάνεται η μελέτη σκοπιμότητας του έργου (επένδυσης). Αναλύεται η παρούσα και μελλοντική ζήτηση της υπό εξέταση επένδυσης. Εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια που εξυπηρετούν τους στόχους που έχουν σαφώς καθορισθεί στο 1^ο βήμα. Όλες οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη σωστή διαχείριση των απαιτούμενων πόρων με στόχο υψηλά κοινωνικό-οικονομικά οφέλη και μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
4. Στο βήμα αυτό διενεργείται η χρηματοοικονομική ανάλυση του έργου. Εξετάζεται η κερδοφορία της επένδυσης τόσο για τον ΚτΕ όσο για τους μετόχους του (πχ αν πρόκειται για δημόσιο έργο μια βασική κατηγορία μετόχων είναι οι πολίτες). Μέσω των ταμειακών ροών της επένδυσης και του κύκλου ζωής της (για ενεργειακές επενδύσεις ο χρόνος κυμαίνεται 15-20 χρόνια) εκτιμώνται τα κοινωνικό-οικονομικά οφέλη και κόστη του έργου.
5. Το πέμπτο βήμα αφορά την οικονομική ανάλυση του έργου. Όλα τα οφέλη και κόστη από την επένδυση πρέπει να αποτιμώνται με τιμές της αγοράς. Το προεξοφλητικό επιτόκιο που χρησιμοποιείται είναι το *κοινωνικό* προεξοφλητικό επιτόκιο (5% ή 3%).
6. Στο τελευταίο βήμα επιχειρείται μία ανάλυση ρίσκου για την εν λόγω επένδυση. Αυτή έχει να κάνει με την αβεβαιότητα που υπάρχει πάντα σε ένα επενδυτικό σχέδιο. Μέσω της διαδικασίας αυτής αναζητούνται οι κρίσιμες μεταβλητές των οποίων οι μεταβολές τους μπορεί να επιδράσουν είτε θετικά είτε αρνητικά στην οικονομική βιωσιμότητα του έργου, όπως αυτές ορίστηκαν στα βήματα 4 και 5. Η διαδικασία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:
 - i. Επιχειρείται μία *ανάλυση ευαισθησίας* με σκοπό την εύρεση των κρίσιμων μεταβλητών του έργου.
 - ii. Επιχειρείται εν συνεχεία μία «*ποιοτική*» *ανάλυση του ρίσκου*, που συνδυάζει τα ενδεχόμενα συμβάντα με την πιθανότητα να συμβούν και τη σοβαρότητα των επιπτώσεων τους. Εν συνεχεία προτείνονται λύσεις αντιμετώπισής τους.
 - iii. Τέλος, επιχειρείται μία «*πιθανοτική*» *ανάλυση του ρίσκου*. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την απόδοση σε κάθε κρίσιμη μεταβλητή της κατανομής της πιθανότητας της να συμβεί (βιβλιογραφία, πειραματικά δεδομένα), στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν οι αθροιστικές κατανομές των δεικτών απόδοσης της επένδυσης (NPV, IRR) μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων (Monte Carlo simulation) και να προταθούν δράσεις για να μειωθούν οι πιθανότητες των κινδύνων αυτών.

Το κύριο *πλεονέκτημα* είναι ότι ικανοποιεί το αξίωμα της ορθολογικής συμπεριφοράς προμετρώντας την κοινωνική αξία των επενδυτικών σχεδίων και των πολιτικών. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι μέσω του κόστους παρουσιάζονται οι απώλειες και μέσω των ωφελειών τα κέρδη που συμβάλλουν στην ευημερία του ανθρώπου. Τα οφέλη και το κόστος μετρούνται από το κατά πόσο ένα άτομο είναι πρόθυμο να πληρώσει για να εξασφαλίσει κέρδη ή να αποδεχθεί τις αναμενόμενες απώλειες.

Το βασικό *μειονέκτημα* της μεθόδου είναι στη δυσκολία μέτρησης των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και των εκτιμήσεων που γίνονται από τους οικονομοτεχνικούς για τις μελλοντικές προβλέψεις του κόστους και των ωφελειών, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

4. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Στις παραπάνω ενότητες παρουσιάστηκε το φάσμα της οικονομικής και κοινωνικής αξιολόγησης επενδυτικών σεναρίων βιώσιμης ενέργειας. Κάθε κατηγορία κριτηρίου μπορεί να περιλαμβάνει πλήθος υποκριτηρίων.

Πίνακας 1: Ενδεικτικές κατηγορίες κριτηρίων και υποκριτηρίων [2]

Περιβαλλοντικά Κριτήρια	Τεχνικά Κριτήρια	Κοινωνικά Κριτήρια
Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG)	Απόδοση	Κοινωνική αποδοχή
Τοποθεσία και χρήση γης	Εγκατεστημένη Ισχύς	Δημιουργία θέσεων εργασίας
Εκπομπές σωματιδίων	Απαιτούμενος χρόνος εγκατάστασης	Οπτική όχληση
Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα	Διάρκεια ζωής	Μέσο εισόδημα εργασίας
Κατανάλωση νερού / Ηχορύπανση	Ωριμότητα τεχνολογίας	
	Σταθερότητα δικτύου	

Η λήψη απόφασης θα πρέπει να ληφθεί υπό το πρίσμα πολλαπλών κριτηρίων. Αυτή η διαδικασία απαιτεί την επεξεργασία των ίδιων των κριτηρίων, καθώς και την αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών για κάθε επεξεργασμένο κριτήριο. Στο τέλος, θα πρέπει να δημιουργηθεί μία συγκεντρωτική εκτίμηση για κάθε εναλλακτική λύση, ώστε να επιτευχθεί η σχετική βαθμολόγηση ή η σειρά κατάταξης των εναλλακτικών. Με βάση τη χρήση της πολυκριτηρίας ανάλυσης και των εργαλείων της προκρίνεται η βέλτιστη λύση. Οι βασικές αρχές που ακολουθεί η πολυκριτηρία μεθοδολογία είναι οι εξής:

- Ορισμός των σχετικών κριτηρίων και του συνόλου των εναλλακτικών.
- Απόδοση μετρήσιμων τιμών και χαρακτηριστικών στη σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων στις διάφορες εναλλακτικές λύσεις.
- Επεξεργασία των παραπάνω στοιχείων για τη δημιουργία σχετικής βαθμολογίας και σειράς κατάταξης.

4.1. Μέθοδοι πολυκριτηρίας ανάλυσης

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν οι βασικότερες μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή σε ενεργειακά έργα. Αναφορικά με τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης στην βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες απόψεις με τις επικρατέστερες να δίνουν τις παρακάτω γενικές ενδεικτικές κατευθύνσεις [2]:

- Αν η απόφαση λαμβάνεται από πολλούς ή από έναν αποφασίζοντα.
- Αν η μέθοδος λαμβάνει υπόψη της την αβεβαιότητα και σε ποιο βαθμό αυτή ενσωματώνεται στα διάφορα στάδια της.
- Η ευχρηστία και ευελιξία της μεθόδου, π.χ. αν επιτρέπει την επαναξιολόγηση.

4.1.1. Θεωρία πολυκριτηρίας χρησιμότητας (Multiattribute Utility Theory - MAUT)

Η μέθοδος αυτή καθορίζει τις προτιμήσεις του υπεύθυνου λήψης απόφασης, οι οποίες συνήθως παριστάνονται ιεραρχικά με τη χρήση της κατάλληλης συνάρτησης χρησιμότητας. Οι εναλλακτικές επιλογές μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Η βασική κριτική της μεθόδου είναι ότι βασίζεται στη λεγόμενη «ανεξαρτησία των κριτηρίων», δηλαδή δεν επηρεάζεται η βαθμολογία μιας εναλλακτικής έναντι ενός κριτηρίου από τη βαθμολογία της έναντι ενός άλλου [4, 5].

4.1.2. Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (Analytical Hierarchy Process – AHP)

Με αυτή τη μέθοδο επιτρέπεται στους αποφασίζοντες να μοντελοποιήσουν ένα σύνθετο πρόβλημα σε μία ιεραρχική δομή, όπου εμφανίζονται οι συσχετίσεις μεταξύ του στόχου, των κριτηρίων, των υποκριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων. Μέσα από έναν συνδυασμό των σχετικών βαρών των κριτηρίων γίνεται η αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών.

4.1.3 Η οικογένεια μεθόδων PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)

Οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται στις σχέσεις υπεροχής ή κυριαρχίας (outranking relations) και συγκρίνει τις σχέσεις προτίμησης ανάμεσα στις εναλλακτικές, ώστε να προκύψει η καλύτερη εναλλακτική [5].

4.1.4 Οι μέθοδοι της οικογένειας ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realite)

Και οι μέθοδοι της οικογένειας αυτής στηρίζονται στις σχέσεις υπεροχής ή κυριαρχίας (outranking relations). Η βασική ιδέα είναι η συστηματική ανάλυση των σχέσεων μεταξύ όλων των δυνατών συνδυασμών των εναλλακτικών επιλογών [6]. Συνήθως η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται προκειμένου να απορριφθούν κάποιες εναλλακτικές και η επιλογή της κατάλληλης εναλλακτικής γίνεται με κάποια άλλη μέθοδο πολυκριτηριακής ανάλυσης.

4.1.5 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ως εναλλακτική της ELECTRE. Η βασική της λογική είναι ότι η βέλτιστη ιδανική λύση θα πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση (Ευκλείδεια απόσταση) από την ιδανική λύση και τη μέγιστη απόσταση από τη χειρότερη λύση. Αρχικά, σχηματίζεται ένας πίνακας αποφάσεων με M εναλλακτικές και N κριτήρια. Καθορίζεται η κανονικοποιημένη μήτρα αποφάσεων και η μήτρα με τα αντίστοιχα βάρη. Για τα κριτήρια που πραγματεύονται όφελος προτιμάται η μεγιστοποίηση των τιμών των εναλλακτικών, ενώ για τα κριτήρια κόστους προτιμάται η ελαχιστοποίηση των τιμών των εναλλακτικών.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1. Εφαρμογή TOPSIS

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα πολυκριτηριακής ανάλυσης που αφορά στη λήψη απόφασης μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών για βιώσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [7].

Η οικεία Περιφέρεια μιας μεγάλης αστικής περιοχής εξετάζει τέσσερις εναλλακτικές λύσεις που αφορούν σε βιώσιμες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά των λύσεων αυτών φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των διαφορετικών λύσεων

Εναλλακτικές λύσεις	Βάρος (w)	Λ1	Λ2	Λ3	Λ4
Κόστος υλοποίησης (εκατ. €) - ΚΥ	0,4	3,5	3,6	3,8	4,0
Βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας (%) - ΒΑΗΕ	0,3	0,55	0,80	0,95	0,70
Χρόνος υλοποίησης (έτη) - ΧΥ	0,1	1,0	1,2	1,4	1,7
Δημιουργούμενες θέσεις εργασίας - ΔΘΕ	0,2	40	33	38	36

Αρχικά δημιουργείται το Μητρώο Απόφασης στο οποίο παρουσιάζονται οι εναλλακτικές λύσεις και οι αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων τους.

Πίνακας 3: Μητρώο Απόφασης

	ΚΥ	ΒΑΗΕ	ΧΥ	ΔΘΕ
Λ1	3,5	0,55	1,0	40
Λ2	3,6	0,80	1,2	33
Λ3	3,8	0,95	1,4	38
Λ4	4,0	0,70	1,7	36

Για να είναι συγκρίσιμες οι τιμές που λαμβάνει κάθε εναλλακτική λύση ανά κριτήριο είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των τιμών με βάση τον παρακάτω τύπο έτσι, ώστε τα κριτήρια να αναχθούν σε μία κοινή αδιάστατη βάση:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3)$$

Πίνακας 4: Κανονικοποιημένο Μητρώο Απόφασης

	KY	BAHE	XY	ΔΘΕ
Λ1	0,4692	0,3599	0,3704	0,5429
Λ2	0,4826	0,5235	0,4444	0,4479
Λ3	0,5094	0,6217	0,5185	0,5157
Λ4	0,5362	0,4581	0,6296	0,4886

Στη συνέχεια θα πρέπει να εξεταστεί και η σημαντικότητα που δίνεται σε κάθε κριτήριο (βάρη). Δημιουργείται λοιπόν το Σταθμισμένο Κανονικοποιημένο Μητρώο Απόφασης πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των κριτηρίων με τα βάρη τους.

Πίνακας 5: Σταθμισμένο Κανονικοποιημένο Μητρώο Απόφασης

W	0,4	0,3	0,1	0,2
	KY	BAHE	XY	ΔΘΕ
Λ1	0,1877	0,1080	0,0370	0,1086
Λ2	0,1930	0,1571	0,0444	0,0896
Λ3	0,2038	0,1865	0,0519	0,1031
Λ4	0,2145	0,1374	0,0630	0,0977

Εν συνεχεία πρέπει να καθοριστεί η ιδανική λύση (A^+) και η ιδανική αρνητική λύση (A^-) γι' αυτό εξετάζεται κατά πόσο τα κριτήρια είναι κριτήρια οφέλους ή κριτήρια κόστους.

- Το KY αποτελεί κριτήριο κόστους (αναζητείται μία οικονομικά βιώσιμη λύση).
- Ο BAHE αποτελεί κριτήριο οφέλους (μία πιο αποδοτική λύση).
- Ο XY αποτελεί κριτήριο κόστους (επιπλέον χρόνος συνεπάγεται επιπλέον κόστος).
- Οι ΔΘΕ αποτελούν κοινωνικό κριτήριο οφέλους.

Επομένως, βάσει των τιμών του προηγούμενου πίνακα η ιδανική και η ιδανική-αρνητική λύση είναι:

- $A^+ = \{0,1877, 0,1865, 0,0370, 0,1086\}$
- $A^- = \{0,2145, 0,1080, 0,0630, 0,0896\}$

Η *Ευκλείδια Απόσταση* από την ιδανική λύση κάθε εναλλακτικής υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (4)$$

Η *Ευκλείδια Απόσταση* από την ιδανική-αρνητική λύση κάθε εναλλακτικής υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (5)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η σχετική εγγύτητα στην ιδανική λύση εφαρμόζοντας για κάθε εναλλακτική τον τύπο:

$$C_i^- = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (6)$$

$0 \leq C_i^- \leq 1$, 1 για την ιδανική λύση, 0 για την ιδανική-αρνητική λύση

Προκύπτουν λοιπόν τα αποτελέσματα του επόμενου πίνακα:

Πίνακας 6: Υπολογισμός της σχετικής εγγύτητας στην ιδανική αρνητική λύση

	S_i^+	S_i^-	$S_i^+ + S_i^-$	C_i^-
Λ1	0,0785	0,0419	0,1204	0,3477
Λ2	0,0362	0,0567	0,0929	0,6101
Λ3	0,0225	0,0812	0,1037	0,7827
Λ4	0,0626	0,0306	0,0931	0,3280

Με βάση τα παραπάνω η λύση που προκρίνεται είναι η Λ3.

5.2. Παράδειγμα υπολογισμού του λόγου B/C για την κατασκευή σταθμού βιοαερίου

Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα αναλυθούν τα κόστη και τα οφέλη που προκύπτουν από την κατασκευή και εκμετάλλευση μιας μονάδας βιοαερίου με βάση το δείκτη B/C σε βάθος μελέτης 20ετίας. Η διάρκεια επιλέγεται έτσι γιατί τα συμβόλαια μεταξύ παραγωγών και Διαχειριστή της ενέργειας είναι 20ετή [8]. Κυρίως θα δοθεί έμφαση στα οφέλη ή στις αρνητικές συνέπειες που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν, αφού εμπίπτουν στην κατηγορία της κοινωνικής αξιολόγησης και άρα στα εξωτερικά κόστη μιας επένδυσης.

Τα κοινωνικά - περιβαλλοντικά οφέλη από την εκμετάλλευση οποιασδήποτε μορφής ενέργειας είναι πολλά.

1. Η παραγωγή οποιασδήποτε ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχει σε κάθε περίπτωση θετικά αποτελέσματα για την οικονομία της χώρας, αφού μειώνει την εισαγωγή ενέργειας από τρίτες χώρες.
2. Με τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας μειώνεται η αντίστοιχη παραγωγή από τη ΔΕΗ η οποία παράγει κατά μέσο όρο 46% από λιγνίτη και 8% από πετρέλαιο. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται και η εισαγωγή ορυκτών καυσίμων. Η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ μεταφράζεται σε ισοδύναμους τόνους CO₂ που θα εκλύονταν, αν η παραγωγή ενέργειας γινόταν από ορυκτά καύσιμα.
3. Από το 2013 η ΔΕΗ υποχρεούται να αγοράζει δικαιώματα ρύπων. Αυτό σημαίνει ότι θα πληρώνει ένα μεγάλο ποσό ανάλογα με την ρυπογόνα ενέργεια που παράγει. Το κόστος αυτό (προσεγγιστικά 1,5 δις €/έτος) πιθανότατα θα μετακυληθεί στους καταναλωτές. Ανανεώσιμες πηγές συνεπάγεται μικρότερη ρυπογόνος ενέργεια και μικρότερο πρόστιμο στο χρηματιστήριο ρύπων.
4. Η παραγωγή βιοαερίου συνεπάγεται μόνιμες θέσεις εργασίας. Ο αριθμός τους εξαρτάται από την δυναμικότητα του σταθμού, αλλά δεν είναι αναλογικός.

Το Βιοαέριο μπορεί να παραχθεί από τρεις βασικές πηγές:

1. *Βιοαποικοδομήσιμα υλικά*, όπως στερεή και υδαρή κοπριά, γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα, οργανικά απόβλητα από αγροτοβιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων που μπορούν να υποστούν χώνευση.
2. *Ενεργειακές καλλιέργειες* (π.χ. καλαμπόκι, σόργος, τριφύλλι).
3. *Απόβλητα*, όπως οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και των υπολειμμάτων εστίασης ή ακόμα και λυματολάσπη βιολογικών καθαρισμών.

Τα υλικά αυτά μπορούν να μεταφερθούν σε σταθμούς βιοαερίου και με τη μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης να παραχθεί το βιοαέριο. Ένας άλλος τρόπος παραγωγής είναι η εκμετάλλευση των απορριμμάτων. Σε αυτή την περίπτωση μετά τη διαδικασία απόρριψης των απορριμμάτων σε ένα ΧΥΤΑ, αυτά καλύπτονται με χώμα. Στο εσωτερικό παράγεται το βιοαέριο από την αποσύνθεση των απορριμμάτων, απουσία οξυγόνου, το οποίο αντλείται μέσω φρεατίων που έχουν κατασκευαστεί για τον λόγο αυτό.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα μιας τέτοιας επένδυσης θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν τα κοινωνικά – περιβαλλοντικά οφέλη και οι αρνητικές επιπτώσεις με βάση το δείκτη B/C. Στο παράδειγμα ο σταθμός που μελετάται είναι ισχύος 1MW.

- *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:* Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχει δύο διαστάσεις. Είναι καθαρή μορφή ενέργειας και έρχεται να αντικαταστήσει ρυπογόνες τεχνικές παραγωγής, όπως η χρήση του λιγνίτη. Αυτό το όφελος είναι κάτι που δύσκολα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Από την άλλη το κόστος της παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας είναι σαφώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος των ρυπογόνων διαδικασιών. Στην αξιολόγηση που θα ακολουθήσει η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας θα καταταγεί στις αρνητικές επιπτώσεις. Το κόστος θα αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Σε ένα πάγιο κόστος κρατικής επιχορήγησης ΚεφΚ και σε ένα δεύτερο κόστος που θα εκφράζει τη συνολική συνεισφορά στην εγγυημένη τιμή. Το κόστος κατασκευής για έναν σταθμό ισχύος 1 MW είναι προσεγγιστικά 3.600.000€. Σύμφωνα με τον Ν.3908/2011 η κατασκευή μπορεί να επιχορηγηθεί με υψηλότερο ποσοστό 50%. Άρα:

$$\text{ΚεφΚ} = 3.600.000\text{€} \times 50\% = 1.800.000\text{€}$$

Για την εξασφάλιση της εγγυημένης τιμής οι πολίτες υποχρεούνται να καταβάλουν το ETMEAP. Μία μεσοσταθμική ετήσια αναπροσαρμογή του τέλους (PAE 2012) για το ίδιο έτος διαμορφώνεται στα 5,43 €/MWh. Η τιμή αυτή θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η αρνητική επίδραση λόγω ειδικού τέλους:

$$\text{Κετ} = 8.000\text{MWh} \times 5,43\text{€/MWh} = 43.440\text{€}$$

Σύμφωνα με το αρ. 25 του Ν.3468/2006 περί "Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΗΑ και λοιπές διατάξεις" κάθε παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. (εξαιρούνται τα φωτοβολταϊκά) επιβαρύνεται, από την έναρξη της εμπορικής λειτουργίας του σταθμού του, με ETMEAP. Το τέλος αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό 3% επί της, προ Φ.Π.Α., τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στον Διαχειριστή του Συστήματος ή του Δικτύου ή των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών και αποδίδεται στον/στους Ο.Τ.Α. όπου είναι εγκατεστημένος ο σταθμός ή διέρχεται κάποιο δίκτυο. Προκύπτει λοιπόν ένα ποσό που συγκαταλέγεται στα οφέλη για την κοινωνία:

$$\text{Οετ} = 3\% \times 8.000\text{MWh} \times 253\text{€/MWh} = 60.720\text{€}$$

- *Παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.* Η παραγωγή ζεστού νερού είναι ένα παράπλευρο κέρδος από τη διαδικασία εκμετάλλευσης βιοαερίου. Ένα μεγάλο ποσοστό παραγόμενου ζεστού νερού χρησιμοποιείται από την μονάδα βιοαερίου για ίδια χρήση, ενώ το υπόλοιπο μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε πουλώντας το με τη μέθοδο της τηλεθέρμανσης. Η τακτική τιμολόγησης αντίστοιχων μονάδων τηλεθέρμανσης είναι να χρεώνεται ο καταναλωτής σαν να χρησιμοποιούσε πετρέλαιο θέρμανσης, αλλά με μία έκπτωση του 20%. Μία μονάδα 1 MW θα παράγει θερμική ισχύ περίπου 970 kW. Αν εκμεταλλευτούμε το 50% της θερμικής ενέργειας, το όφελος για τους πολίτες θα είναι η εξοικονόμηση του 20%. Με μία τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας 98,16 €/kW (2012)

$$\text{Οζν} = 50\% * 0,970 [\text{MW}] * 8.000 [\text{h}] 20\% * 98,16 [\text{€/MWh}] = 76.172 \text{€}$$

- *Μείωση κατανάλωσης καυσίμων - Δικαιώματα ρύπων.* Για την παραγωγή ενέργειας η ΔΕΗ χρησιμοποιεί προσεγγιστικά 46% λιγνίτη, 8% πετρέλαιο και 26% φυσικό αέριο, όπως αναφέρεται στους λογαριασμούς ρεύματος. Το 80% λοιπόν της ενέργειας παράγεται με τη χρήση κάποιου καυσίμου, ενώ το υπόλοιπο 20% προέρχεται από ΑΠΕ, υδροηλεκτρικούς σταθμούς και διασυνδέσεις. Μπορούμε λοιπόν εύλογα να υποστηρίξουμε ότι η παραγωγή ενός ποσού ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αντικαθιστά ένα αντίστοιχο ποσό ρυπογόνων ενέργειας. Κατά μέσο όρο η μόλυνση που προκαλούν τα εργοστάσια της ΔΕΗ υπολογίζεται σε 1 tonCO₂/MWh. Συνεπώς, η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας θα μειώνει τους εκπνεόμενους ρύπους κατά:

$$8.000 \text{ MWh} \times 1 \text{ tonCO}_2/\text{MWh} = 8.000 \text{ tonCO}_2$$

Η τιμή δικαιωμάτων διαπραγματεύεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα περίπου 8 €/tonCO₂ για το 2012. Έτσι το ποσό το οποίο θεωρείται κέρδος για το 2012 είναι :

$$\text{Οδρ} = 8.000 \text{ tonCO}_2 \times 7 \text{ €/tonCO}_2 = 56.000\text{€}$$

Στην αξιολόγηση θα θεωρηθεί μια αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων στα 100 €/tonCO₂ σε βάθος 20ετίας ή κατά 4,65 €/tonCO₂ ανά έτος. Αντίστοιχα η ετήσια αύξηση του οφέλους από τα δικαιώματα ρύπων θα είναι 37.200 €.

- **Νέες θέσεις εργασίας.** Τα εργοστάσια παραγωγής ρεύματος από βιοαέριο απαιτούν θέσεις εργασίας. Ένα εργοστάσιο σαν αυτό του παραδείγματος απαιτεί περίπου 2 άτομα μόνιμο προσωπικό. Η βαρύτητα της εργασίας είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, αφού πρέπει να συνυπολογιστούν παράγοντες, όπως η συνεισφορά του εργοδότη σε ένα ασφαλιστικό ταμείο ή και τα ανταποδοτικά οφέλη που θα έχει το κράτος με την αύξηση του αγοραστικού κοινού (φορολογικές εισφορές). Ακόμα η αύξηση θέσεων εργασίας σε μία τοπική κοινωνία συνεισφέρει στην υγιή λειτουργία των λοιπών τοπικών επιχειρήσεων. Στην προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί η απασχόληση, θεωρείται ότι τα άτομα αυτά θα έμειναν χωρίς εργασία και το κράτος θα έπρεπε να τα χρηματοδοτεί για ένα χρόνο τουλάχιστον. Το επίδομα του ΟΑΕΔ είναι 360 €. Άρα θεωρούνται ετήσιες απολαβές για κάθε άνεργο $14 \times 360 = 5.040\text{€}$:

$$\text{Ο}\theta\epsilon = 2 \theta.\epsilon. \times 5.040\text{€/}\theta.\epsilon. = 10.080\text{€}$$

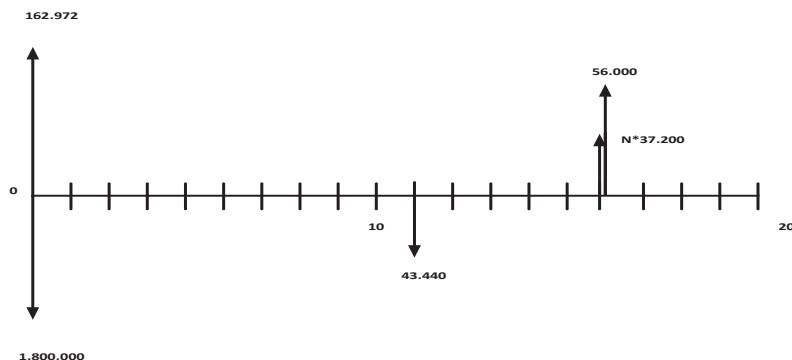
- **Αντισταθμιστικά οφέλη για τοπικές κοινωνίες.** Οι ρυπογόνες βιομηχανίες παραγωγής ρεύματος αποζημιώνουν τις τοπικές κοινωνίες για την μόλυνση που προκαλούν με μια εισφορά. Το ποσό αυτό που εισπράττουν οι τοπικές κοινωνίες θα μπορούσε να θεωρηθεί όφελος αν η αξιολόγηση γινόταν σε τοπικό επίπεδο. Σε επίπεδο επικρατείας όμως θεωρείται σαν έξοδο το οποίο αποφεύγεται όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές.
- Σύμφωνα με την παρ.7 του αρ.52 του Ν.4042/2012 περί "Ποινικής προστασίας του περιβάλλοντος - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ - Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ - Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής" ισχύει:

Επιβάλλεται υπέρ του ειδικού διαχειριστικού Λογαριασμού του άρθρου 40 του ν. 2773/1999 και σε βάρος των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη ΕΤΜΕΑΡ δύο (2) ευρώ ανά MWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη. Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής καθορίζεται ο τρόπος και η διαδικασία είσπραξης και απόδοσης του εν λόγω τέλους στον ανωτέρω Λογαριασμό, καθώς και κάθε άλλο σχετικό θέμα. Με όμοια απόφαση μετά από γνώμη της ΡΑΕ δύναται να αναπροσαρμόζεται το τέλος αυτό.

Με δεδομένο ότι το όποιο ΕΤΜΕΑΡ θα μετακυλιστεί στους καταναλωτές, θεωρείται αυτό το ποσό σαν όφελος το οποίο μπορεί να προέλθει από την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Έτσι για μια παραγόμενη ενέργεια 8.000 MWh το κέρδος θα είναι:

$$\text{Ο}\lambda 2 = 8.000 \text{ MWh} \times 2\text{€/MWh} = 16.000\text{€}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή των δαπανών και των εσόδων για 20 έτη. Στο χρονικό σημείο 0 φαίνονται τα έξοδα κατασκευής της μονάδας. Τα επόμενα έτη διακρίνονται τα οφέλη και οι αρνητικές επιπτώσεις με σταθερή τιμή και το όφελος από τη μείωση των δαπανών για τα δικαιώματα ρύπων που θεωρούμε ότι αυξάνονται γραμμικά.



Εικόνα 1: Κατανομή δαπανών και εσόδων στην 20ετία

Για να κάνουμε συγκρίσιμα τα μεγέθη αυτά θα υπολογίσουμε τις παρούσες αξίες τους. Θα ισχύει λοιπόν:

$$B = 162.972 (P/A, 5\%, 20 \text{ χρόνια}) + 56.000 (P/A, 5\%, 20 \text{ χρόνια}) + 37.200 (P/G, 5\%, 20 \text{ χρόνια}) = \underline{6.410.397.}$$

$$C = 1.800.000 + 43.440 (P/A, 5\%, 20 \text{ χρόνια}) = \underline{2.341.258.}$$

Ο λόγος $B/C = 2,74$ και **άρα η επένδυση αποδεκτή.**

Όπου B είναι λοιπόν τα οφέλη που θα έχει μία κοινωνία από τη κατασκευή και λειτουργία ενός σταθμού βιοαερίου μεταφρασμένα σε χρηματική αξία σε βάθος 20ετίας. Το πρώτο μέρος είναι τα σταθερά οφέλη που υπολογίστηκαν και το δεύτερο και τρίτο μέρος είναι το όφελος από τα δικαιώματα ρύπων το οποίο αναλύθηκε σε δύο συνιστώσες. Αντίστοιχα C είναι το συνολικό κόστος, που ισοδυναμεί με την κρατική επιχορήγηση και τα λειτουργικά έξοδα της μονάδας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ενεργειακό πρόβλημα είναι πολυδιάστατο με ευρύ φάσμα επιλογών, κριτηρίων αξιολόγησης και πολλών λύσεων. Με την παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια αποτύπωσης των σύγχρονων μεθόδων και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για να εξετασθεί αν μία επένδυση είναι βιώσιμη λαμβάνοντας οικονομικά και κοινωνικά – περιβαλλοντικά κριτήρια.

Παρουσιάστηκαν αναλυτικά δύο παραδείγματα προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία που αναφέρθηκε. Η έκταση της ανάλυσης που επιχειρήθηκε βοηθά τον αναγνώστη στην κατανόηση των οικονομικών και ποιοτικών κριτηρίων για ενεργειακά έργα, όπως αυτά αποτιμώνται στην αξιολόγηση επενδύσεων ενεργειακών έργων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Peurifoy R., Schexnayder C., Shapira A., Schmitt R., 2011, Construction Planning, Equipment and Methods, Mc-Graw Hill, International Edition, Ch. 2.
- [2] Ενέργεια - Δίκτυα & Υποδομές, 2014, Νομική Βιβλιοθήκη, Κεφ. III.
- [3] European Commission, 2015, Guide to Cost – Benefit Analysis of Investment Projects.
- [4] Ishizaka, A. & Nemery, P., 2013, Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software, West, Sussex, UK: John Wiley and Sons.
- [5] Tzeng, G.H. & Huang, J.J., 2011, Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications, Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group.
- [6] Brans, J.P., 1985 “A Preference Ranking Organization Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)”, Management science.
- [7] Σημειώσεις Μεταπτυχιακού Μαθήματος, Ανάλυση Αποφάσεων και Επικινδυνότητας, ΜΠΣ: Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, 2013, ΑΠΘ.
- [8] Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Αξιολόγηση βιωσιμότητας μικρών μονάδων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού Θερμότητας -ΣΗΘ- από βιοαέριο, 2012, Διαμαντής Βασίλειος, ΜΠΣ: Διαχείριση Τεχνικών Έργων, ΕΑΠ.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΣΕ ΕΝΙΑΙΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Π. Μπάκανος*, Κ.Λ. Κασιφαράκης

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ,
541 24 Θεσσαλονίκη

*e-mail: pbakanos@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ορθολογική χρήση του νερού στη σύγχρονη εποχή και ο πολλαπλός του ρόλος, για την κάλυψη των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση, την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, τη βιομηχανική χρήση, τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα, την αντιπλημμυρική προστασία και τη διατήρηση των οικοσυστημάτων, απαιτούν τη λήψη σύνθετων και δύσκολων αποφάσεων για τις βέλτιστες πολιτικές διαχείρισης που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Το μεγάλο οικονομικό κόστος κατασκευής νέων μεγάλης κλίμακας υδραυλικών και ενεργειακών έργων, σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη φάση υλοποίησής τους, καθιστούν αναγκαία την έρευνα για την ανάπτυξη νέων τεχνικών προσομοίωσης και βελτιστοποίησης για την αξιοποίηση και βελτίωση των διαθέσιμων υποδομών. Η πολυπλοκότητα και η στοχαστική φύση της χρονικής και χωρικής κατανομής των ροών προσφοράς και ζήτησης για νερό και ενέργεια, απαιτεί την αναλυτική διερεύνηση της λειτουργίας των συστημάτων αυτών για πολλούς στόχους, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα συνολικά οφέλη.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός πολυσύνθετου συστήματος ταμιευτήρων σε σειρά, το οποίο βρίσκεται στον ποταμό Αλιάκμονα, στη Δυτική Μακεδονία και εξυπηρετεί πολλούς στόχους. Η λειτουργία και η απόδοση του συστήματος, εξετάζονται και αναλύονται σε ενιαίο χρονικό ορίζοντα ενός έτους και με βήμα μηνός, για τρία διαφορετικά υδρολογικά σενάρια, ξηρό, μέσο και υγρό, ενώ στη συνέχεια αξιολογούνται τα αποτελέσματα. Η διαδικασία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του συστήματος υλοποιήθηκε στην εργασία μας μέσω της ανάπτυξης ενός κώδικα βασισμένου στη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στάθμη στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα πρέπει να διατηρείται στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο από την αρχή του έτους και για όσο το επιτρέπουν οι περιορισμοί του προβλήματος, ενώ η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται από το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του φράγματος του Πολυφύτου.

Λέξεις Κλειδιά: συστήματα ταμιευτήρων, βελτιστοποίηση, γενετικοί αλγόριθμοι, υδροηλεκτρική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των συστημάτων ταμιευτήρων αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές λόγω της υψηλής διαστατικότητας, της μη στοχαστικότητας, της μη γραμμικότητας και της δυναμικής του προβλήματος της λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες. Κατά τις προηγούμενες δεκαετίες η έρευνα στον τομέα αυτό βασίστηκε κυρίως στις κλασικές μεθόδους του μαθηματικού προγραμματισμού, όπως ο γραμμικός, ο μη γραμμικός και ο δυναμικός προγραμματισμός και παραλλαγές αυτών. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την εφαρμογή των εξελικτικών αλγορίθμων, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, στη διαχείριση αυτών των προβλημάτων, λόγω της ικανότητας και της ευελιξίας τους στο να αναζητήσουν τις βέλτιστες λύσεις.

1. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

1.1. Ανάλυση της λειτουργίας των συστημάτων

Ο βασικότερος στόχος της διερεύνησης της λειτουργίας των ταμιευτήρων είναι να αποφασιστεί πόσο νερό πρέπει να απελευθερωθεί τώρα και πόσο πρέπει να διατηρηθεί για μελλοντική χρήση, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα ή τις υπάρχουσες πληροφορίες στην αρχή του τρέχοντος χρονικού διαστήματος, ώστε να επιτευχθεί ένας ή και περισσότεροι στόχοι. Οι υδρόλογοι μηχανικοί, για τον σχεδιασμό της διαχείρισης των υδατικών πόρων, από καιρό έχουν αναγνωρίσει ότι τα οφέλη από τη συνδυασμένη λειτουργία ενός συστήματος πολλών ταμιευτήρων, μπορούν να υπερβούν τα οφέλη που επιτυγχάνονται από την χρήση του κάθε ταμιευτήρα ανεξάρτητα. Στην πράξη, οι διαχειριστές των ταμιευτήρων ακολουθούν συνήθως τις καμπύλες των κανόνων λειτουργίας, οι οποίες ορίζουν τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για να ρυθμίσουν την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και να βελτιστοποιήσουν τα οφέλη του, κάτω από διάφορες υδρολογικές συνθήκες.

2. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

2.1. Εισαγωγή στους γενετικούς αλγορίθμους

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του 1960 και του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του [1]. Αποτελούν μια τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης, η οποία βασίζεται στις αρχές της γενετικής και της φυσικής επιλογής. Η μέθοδος μιμείται την βιολογική εξέλιξη και βασίζεται στη θεωρία της φυσικής επιλογής του Δαρβίνου. Σύμφωνα με τη θεωρία της εξέλιξης, κάθε είδος συνεχώς αναζητά την καλύτερη προσαρμογή στο περιβάλλον διαβίωσής του και την εύρεση της ευνοϊκότερης δυνατής θέσης του.

2.2. Περιγραφή της μεθόδου

Η διαδικασία βελτιστοποίησης με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων αρχίζει με την κωδικοποίηση των τιμών των μεταβλητών απόφασης σε μια σειρά χαρακτήρων (συμβολοσειρά), η οποία σε αναλογία με το βιολογικό πρότυπο ονομάζεται χρωμόσωμα (ή άτομο) και αποτελεί μια τυχαία δυνατή λύση του εξεταζόμενου προβλήματος. Ακολουθεί η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, ο οποίος αποτελείται από έναν αριθμό από τυχαίως δημιουργούμενα χρωμοσώματα. Τα άτομα αυτά αξιολογούνται με βάση μαθηματικώς διατυπωμένα κριτήρια, και σε καθένα από αυτά αποδίδεται μια τιμή καταλληλότητας. Στη συνάρτηση καταλληλότητας μπορεί να περιλαμβάνονται ποινές, που τη μειώνουν όταν η αντίστοιχη λύση παραβιάζει περιορισμούς του προβλήματος. Στη συνέχεια δημιουργείται η επόμενη γενιά χρωμοσωμάτων με τη βοήθεια τριών βασικών τελεστών (πιθανόν και άλλων πρόσθετων), που μιμούνται βιολογικές διαδικασίες.

Πρώτα εφαρμόζεται ο τελεστής της επιλογής (selection), σύμφωνα με τον οποίο τα καταλληλότερα χρωμοσώματα έχουν περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και αναπαραγωγής, με βάση τη θεωρία του Δαρβίνου περί επιβίωσης του καλύτερα προσαρμοσμένου στο περιβάλλον. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι επιλογής είναι ο τροχός της ρουλέτας με άνισα διαστήματα (biased roulette wheel) και ο διαγωνισμός (tournament). Οι παραπάνω μέθοδοι δεν εξασφαλίζουν πλήρως ότι θα περάσει το καλύτερο χρωμόσωμα μιας γενιάς στην επόμενη. Για να διασφαλισθεί η «επιβίωση» του ισχυρότερου χρωμοσωματος, σε πολλούς κώδικες ενσωματώνεται μια πρόσθετη διαδικασία, που ονομάζεται ελιτισμός [2].

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο τελεστής της διασταύρωσης, με τον οποίο σχηματίζονται απόγονοι από την ένωση δύο αρχικών χρωμοσωμάτων, ανταλλάσσοντας τυχαία τμήματά τους. Η βασική ιδέα είναι ότι τουλάχιστον ένα από τα νέα χρωμοσώματα θα μπορούσε να είναι καλύτερο από τους δύο γονείς, αν περιλάβει ορισμένα από τα καλύτερα χαρακτηριστικά τους. Τέλος εφαρμόζεται ο τελεστής της μετάλλαξης, ο οποίος αλλοιώνει ορισμένους από τους χαρακτήρες που απαρτίζουν τις συμβολοσειρές των χρωμοσωμάτων, εισάγοντας νέες γενετικές δομές και προσδίδοντας κάποια πρόσθετη μεταβλητότητα και ποικιλομορφία στον πληθυσμό. Η μετάλλαξη βοηθά τον αλγόριθμο στο να μην παγιωθεί στα τοπικά βέλτιστα, ώστε να οδηγηθεί στο ολικό βέλτιστο. Η διαδικασία αυτή (αξιολόγηση χρωμοσωμάτων-εφαρμογή των τελεστών) επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό γενεών, εξαρχής καθορισμένο ή προκύπτοντα από κάποιο κριτήριο τερματισμού. Αναμένεται ότι την τελευταία γενεά θα έχει ευρεθεί η βέλτιστη, ή τουλάχιστον, μια πολύ καλή λύση του προβλήματος.

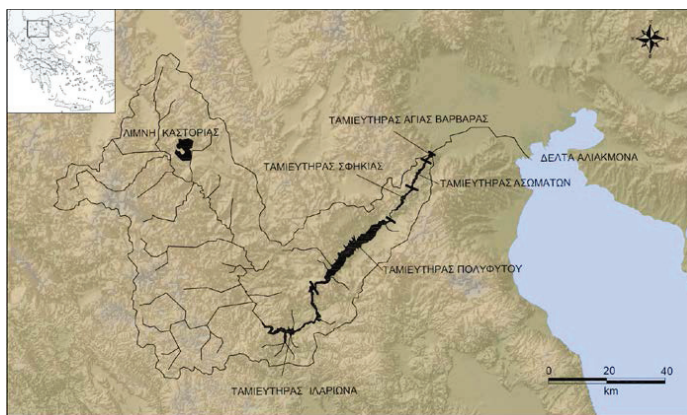
2.3. Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων στη διαχείριση των ταμιευτήρων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε πολλά προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες εφαρμογές: Οι Esat και Hall [3] εφάρμοσαν ΓΑ για να επιλύσουν ένα θεωρητικό πρόβλημα λειτουργίας τεσσάρων ταμιευτήρων, με στόχο τη μεγιστοποίηση του οφέλους από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και την προσφορά νερού για αρδευτικούς σκοπούς, έχοντας περιορισμούς ως προς την αποθηκευτικότητα και τις εκροές των ταμιευτήρων. Οι Oliveira και Loucks [4] τους χρησιμοποίησαν για να αξιολογήσουν τους κανόνες λειτουργίας συστημάτων πολλών ταμιευτήρων και κατέδειξαν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες πολιτικές λειτουργίας. Οι Wardlaw και Sharif [5] τους υιοθέτησαν για να επιλύσουν ένα αποικρατικό, πεπερασμένου ορίζοντα λειτουργίας, σύστημα πολλών ταμιευτήρων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε μη γραμμικά και σύνθετα συστήματα υδατικών πόρων. Πρόσφατα, οι Hical κ.ά. [6] τους εφάρμοσαν σε ένα σύστημα πολλών ταμιευτήρων για να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: την συμβατική (μηνιαία) προσέγγιση και την προσέγγιση σε πραγματικό χρόνο.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ

3.1. Περιγραφή του συστήματος ταμιευτήρων στη λεκάνη απορροής του Αλιάκμονα

Ο Αλιάκμονας είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας, που βρίσκεται εξ ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος, συγκεκριμένα στη Δυτική Μακεδονία. Έχει μήκος 310 km, μέση ετήσια απορροή λίγο πάνω από δύο δισεκατομμύρια m³ νερού και αποτελεί έναν από τους κυριότερους επιφανειακούς υδατικούς πόρους του 9ου υδατικού διαμερίσματος. Η έκταση της λεκάνης απορροής στον άνω ρου του ποταμού είναι 6100 km² και το σύστημα ταμιευτήρων σε σειρά του ποταμού από τα ανάντη στα κατάντη, περιλαμβάνει τον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα (5005 km²), του Πολυφύτου (830 km²), της Σφηκιάς (175 km²), των Ασωμάτων (70 km²) της και της Αγίας Βαρβάρας (20 km²), όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 1, ενώ τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 1: Λεκάνη απορροής του ποταμού Αλιάκμονα ανάντη του φράγματος της Αγίας Βαρβάρας

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων [7]

Ταμιευτήρας	Ιλαρίωνα	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα	Αγία Βαρβάρα - Λίμνη Αναρρύθμισης
Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (m)	403,50	293,00	147,00	89,00	42,50
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	398,50	291,00	146,00	85,50	42,00
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	366,00	270,00	141,80	81,00	38,75
Συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα (hm ³)	379,64	1.939,00	99,00	53,00	5,90
Ωφέλιμος Όγκος (hm ³)	270,14	1.220,00	18,00	10,00	4,50
Ελάχιστος Όγκος (hm ³)	109,50	719,00	81,00	43,00	1,40
Επιφάνεια (km ²)	21,90	74,00	4,30	2,60	0,90
Ονομαστική Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	157,30	(3x125) 375	(3x105) 315	(2x55) 110	0,92
Ωφέλιμο ύψος πτώσης (m)	124,30	145,60	62,00	42,00	15,00
Παροχή προσαγωγού (m ³ /sec)	160(2X80)	315 (3x105)	630(3X210)	320(2X160)	8,00
Ειδική Κατανάλωση για Παραγωγή (m ³ /kWh)	4,10	3,20	7,20	10,00	32,00

3.2. Επίλυση του προβλήματος της μακροπρόθεσμης βελτιστοποίησης με ΓΑ

3.2.1. Στόχοι του προβλήματος

Στόχος του προβλήματος είναι να μεγιστοποιηθεί η ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα, ικανοποιώντας συγχρόνως όλους τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς και καλύπτοντας τις ανάγκες για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση (ψύξη ΑΗΣ) και την περιβαλλοντική ροή. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στην σχέση 1:

$$\text{Maximize Energy (GWh)} = \sum_{r=1}^5 \sum_{t=1}^{12} R_{r,t} \times H_{r,t} \times SE_{r,t} \quad (1)$$

όπου $R_{r,t}$ η διερχόμενη ποσότητα από τον ΥΗΣ το μήνα t σε hm³ για παραγωγή ενέργειας, $H_{r,t}$ το ολικό ύψος πτώσης του ΥΗΣ σε hm και $SE_{r,t}$ η ειδική ενέργεια του ΥΗΣ σε GWh/hm³.

3.2.2. Περιορισμοί του συστήματος

Οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος είναι (όλες οι ποσότητες υδάτων είναι σε hm³).

i. Εξισώσεις συνέχειας ή υδατικού ισοζυγίου:

$$S_{r,t+1} = S_{r,t} + I_{r,t} - Q_{r,t} - R_{r,t} \quad \forall t=1,2,\dots,12 \quad r=1,2 \quad (2)$$

όπου r ο ταμιευτήρας και t το χρονικό βήμα προσομοίωσης (μήνας), $S_{r,t}$ και $S_{r,t+1}$ οι όγκοι νερού που είναι αποθηκευμένοι στην αρχή και το τέλος του χρονικού βήματος αντιστοίχως, $I_{r,t}$ οι εισροές υδάτων από τη λεκάνη στα ανάντη του φράγματος και $Q_{r,t}$ οι απολήψεις υδάτων από τον ταμιευτήρα του φράγματος.

Η επίδραση της εξάτμισης έχει συνυπολογιστεί στις επιφανειακές απορροές, οι υπόγειες διαφυγές θα αγνοηθούν, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, ενώ δεν θα επιτρέπεται υπέρβαση της ανώτατης στάθμης λειτουργίας και υπερχειλίσεις υδάτων σε κανένα ταμιευτήρα. Οι ταμιευτήρες της Σφηκιάς, των Ασωμάτων και της Αγίας Βαρβάρας, λόγω του μικρού τους ωφέλιμου όγκου και του μεγάλου χρονικού βήματος του μηνός, θα διοχετεύουν στα κατόντη ολόκληρες τις ποσότητες υδάτων που εισρέουν από τα ανάντη φράγματα και τη λεκάνη απορροής τους, παράγοντας υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ δεν θα εξεταστεί η αντιληπτή λειτουργία του ΥΗΣ της Σφηκιάς στην παρούσα μελέτη.

ii. Περιορισμοί στην αποθηκευτικότητα του κάθε ταμιευτήρα:

$$S_{r,\min} \leq S_{r,t} \leq S_{r,\max} \quad (3)$$

iii. Περιορισμοί στις εκροές του κάθε ταμειυτήρα:

$$R_{r,\min} \leq R_{r,t} \leq R_{r,\max} \quad (4)$$

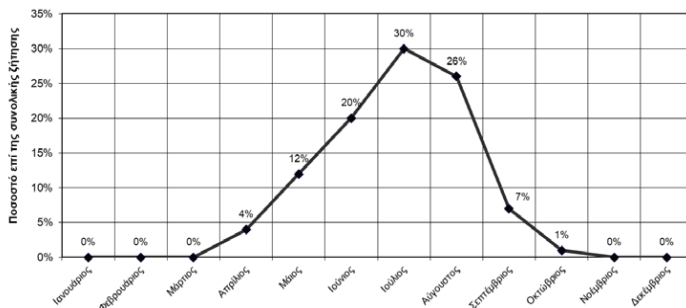
iv. Συνθήκη τελικού όγκου στόχου σε σχέση με τον αρχικό στους ταμειυτήρες:

$$S_{r,12} \geq S_{r,0} \quad (5)$$

3.2.3. Κάλυψη υδατικών αναγκών ύδρευσης, άρδευσης, βιομηχανικής ψύξης και περιβαλλοντικής ροής

Πρέπει να καλυφθούν οι ακόλουθες υδατικές ανάγκες, οι οποίες είναι συμβατές με τα Σχέδια Διαχείρισης των Λεκανών απορροής ποταμών των υδατικών διαμερισμάτων Δυτικής Μακεδονίας (ΥΔ09) και Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΔ10):

- Ύδρευση του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης με συνεχή παροχή $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ ή 63 hm^3 ετησίως.
- Άρδευση μέσω της ενωτικής διώρυγας Αλιάκμονα-Αξιού (Α0), των πεδιάδων Θεσσαλονίκης - Λαγκαδά με 365 hm^3 και των παραλίμνιων περιοχών του Δήμου Σερβίων-Βελβεντού, από την τεχνητή λίμνη του Πολυφύτου με 35 hm^3 , με ετήσια κατανομή σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Ετήσια κατανομή της ζήτησης αρδευτικού νερού από το σύστημα [8]

- Ψύξη των ατμοηλεκτρικών σταθμών του λεκανοπεδίου Κοζάνης-Πτολεμαΐδας με 65 hm^3 ετησίως.
- Συνεχής περιβαλλοντική ροή $4,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ (140 hm^3 ετησίως) κατόπιν του αναρρυθμιστικού φράγματος της Αγίας Βαρβάρας στην κοίτη του ποταμού Αλιάκμονα, για την διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας στο δέλτα του ποταμού.

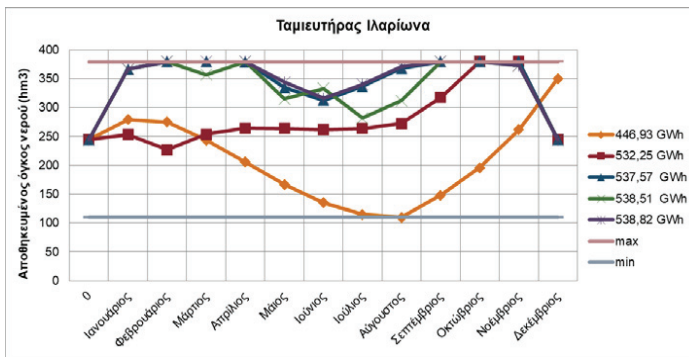
3.3. Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τα τρία υδρολογικά σενάρια και σχολιασμός αυτών

Στα τρία σενάρια που εξετάστηκαν για την προσομοίωση-βελτιστοποίηση του συστήματος, θεωρήσαμε ότι το υδατικό απόθεμα στην αρχή έτους για τους ταμειυτήρες του Πολυφύτου και του Ιλαρίωνα, θα είναι στο ήμισυ του ωφέλιμου όγκου τους, ενώ στο πέρας του χρονικού ορίζοντα λειτουργίας, δηλαδή στο τέλος του έτους, ο τελικός όγκος του θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος, αν όχι μεγαλύτερος, σε σχέση με τον αρχικό. Τα όρια ανάμεσα στην ανώτατη και την κατώτατη στάθμη λειτουργίας για τους ταμειυτήρες αυτούς θα τηρηθούν αυστηρά και η διακύμανση θα περιοριστεί στα όρια της ωφέλιμης χωρητικότητας, αποκλείοντας ανεξέλεγκτες απώλειες, λόγω λειτουργίας των υπερχειλιστών. Η μέγιστη μηνιαία παροχευτικότητα των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων ορίστηκε για τον ΥΗΣ του Ιλαρίωνα σε 300 hm^3 και για τον ΥΗΣ του Πολυφύτου σε 500 hm^3 , αρκετά μικρότερη της θεωρητικής τους, ώστε να υπάρχει χρονικό περιθώριο για τις εργασίες συντήρησης των σταθμών παραγωγής.

Η απόληψη νερού από τον ταμειυτήρα του Πολυφύτου για την ψύξη των ατμοηλεκτρικών σταθμών του λεκανοπεδίου Κοζάνης-Πτολεμαΐδας και για τις υπόλοιπες παραλίμνιες χρήσεις νερού, ορίστηκε στα $100 \text{ hm}^3/\text{έτος}$. Η ζήτηση για την άρδευση των πεδιάδων της Θεσσαλονίκης-Λαγκαδά καθορίστηκε στα $400 \text{ hm}^3/\text{έτος}$ για το ξηρό και το μέσο υδρολογικό σενάριο, ενώ για το υγρό στα $500 \text{ hm}^3/\text{έτος}$.

3.3.1. Πρώτο σενάριο: λειτουργία του συστήματος ταμιευτήρων σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες

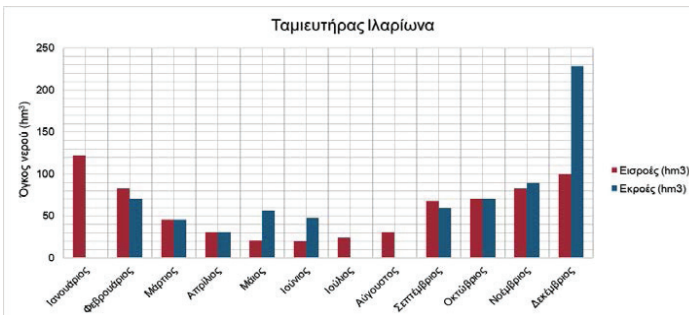
Στο σενάριο των ξηρών υδρολογικών συνθηκών σε χρονικό ορίζοντα ενός έτους, η συνολική ετήσια καθαρή φυσική εισροή νερού στο σύστημα του ποταμού υπολογίστηκε σε 853,15 hm³. Η μέγιστη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίστηκε από τον ΓΑ, ικανοποιώντας αυστηρά την τήρηση όλων των δεσμεύσεων για την κάλυψη των υπόλοιπων χρήσεων νερού, ήταν για συγκεκριμένο σενάριο 538,82GWh.



Εικόνα 4: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το ξηρό υδρολογικά σενάριο

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4, παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα, κάθε μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει και μια πολιτική λειτουργίας με βάση λύσεις του ΓΑ, στο συγκεκριμένο πρόβλημα διαχείρισης πόρων. Η βέλτιστη λύση ή αλλιώς η βέλτιστη πολιτική λειτουργίας αποτελεί το ζητούμενο του προβλήματος και ίσως να μην έχει προσεγγισθεί από τον ΓΑ, καθώς μπορεί οι εικονιζόμενες καμπύλες στο διάγραμμα να αποτελούν τοπικά επι μέρους βέλτιστες λύσεις του προβλήματος και όχι την ολική βέλτιστη λύση.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει η τάση να αυξάνεται η συνολικά παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια του συστήματος, όσο η πολιτική λειτουργίας του Ιλαρίωνα οδηγεί σε στάθμες κοντά στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας του. Φαίνεται δηλαδή ότι ο ΓΑ προσεγγίζει τη λύση εκείνη, για την οποία ο ταμιευτήρας τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, όπου έχουμε και τις μεγαλύτερες εισροές υδάτων, τείνει να φτάσει στα μέγιστα όρια του ωφέλιμου όγκου του, περιορίζοντας τις εκροές όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5, όπου παρουσιάζεται το ισοζύγιο εισρών-εκρών του ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα. Η υψηλή στάθμη του ταμιευτήρα έχει θετική επίδραση στην παραγωγή της ενέργειας, καθώς αυξάνεται το διαθέσιμο ωφέλιμο ύψος πτώσης στον ΥΗΣ και ως εκ τούτου, ο ΓΑ προσεγγίζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερα επίπεδα αποθηκευμένου όγκου.

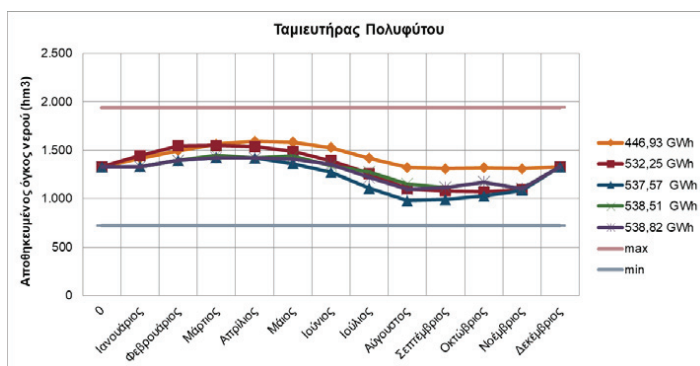


Εικόνα 5: Ισοζύγιο εισρών και εκρών στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για το ξηρό υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 538,82GWh

Από το Φεβρουάριο έως τον Απρίλιο ο ΥΗΣ του Ιλαρίωνα διατηρεί το ανώτατο επίπεδο της στάθμης και παράγει σημαντικές ποσότητες ενέργειας, από την εκροή της επιπλέον ποσότητας υδάτων που εισέρχεται σε αυτόν και δεν μπορεί να την αποθηκεύσει. Από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο εκφορτίζεται

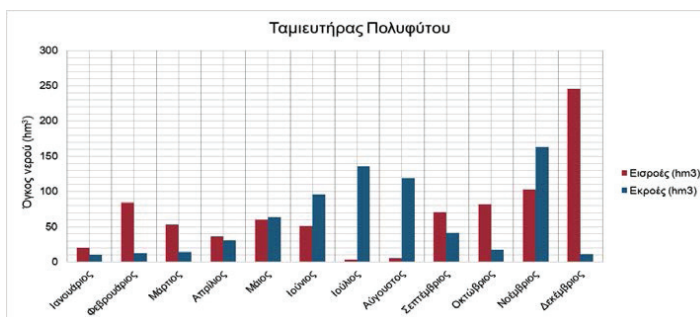
μερικώς έως ένα επίπεδο, αφενός μεν για να καλύψει τις μεγάλες ζητήσεις για άρδευση στα κατάντη, αφετέρου δε διότι προσπαθεί να διατηρήσει όσο το δυνατόν πιο υψηλά το επίπεδο του ταμιευτήρα του Πολυφύτου, για να του εξασφαλίζει υψηλή ειδική ενέργεια παραγωγής στον ΥΗΣ του, αφού είναι υποχρεωμένος να δουλεύει για να καλύψει τη μεγάλη ζήτηση για άρδευση. Από τον Ιούλιο έως και τον Αύγουστο ο ΥΗΣ του Ιλαρίωνα υπολειπεται, αποθηκεύοντας τις εισροές, ώστε να επανέλθει η στάθμη του στα μέγιστα επίπεδα τον μήνα Σεπτέμβριο. Από τον Σεπτέμβριο έως και τον Νοέμβριο, όπου αυξάνονται οι εισροές, και δεδομένου ότι έχει σχεδόν μηδενισθεί η δυνατότητα περαιτέρω αποθήκευσης νερού, εκρέουν διαρκώς όλες οι ποσότητες που δέχεται, παράγοντας συνεχώς ενέργεια με μικρή ειδική κατανάλωση νερού. Τον μήνα Δεκέμβριο, προκειμένου να επανέλθει στον τελικό όγκο-στόχο, όπως τέθηκε από τη διατύπωση του προβλήματος, εκρέουν όλες οι επιπλέον ποσότητες νερού, παράγοντας το μεγαλύτερο μηνιαίο ποσό ενέργειας σε όλο το έτος.

Στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου, εξετάζοντας τις καμπύλες των πολιτικών λειτουργίας του ΓΑ στην Εικόνα 6, βλέπουμε ότι διατηρείται περίπου παρόμοια η εικόνα του προφίλ των καμπυλών με μικρές διαφορές, σε αντίθεση με τον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα, όπου εμφανίζονται εντελώς διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πιθανή βέλτιστη πολιτική λειτουργίας, την οποία υπέδειξε ο ΓΑ, βρίσκεται περίπου ανάμεσα στις υπόλοιπες υποψήφιες λύσεις και εκτιμάται ότι σε αυτή την περιοχή κινείται και η ολικά βέλτιστη.



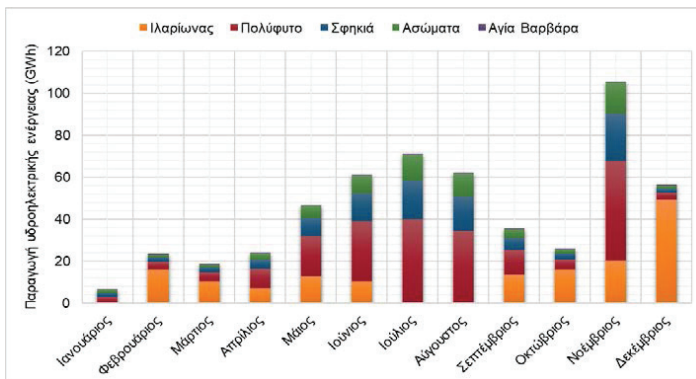
Εικόνα 6: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το ξηρό υδρολογικά σενάριο

Με βάση αυτή την πολιτική λειτουργίας, ο ΥΗΣ του Πολυφύτου λειτουργεί συντηρητικά από τον Ιανουάριο μέχρι τον Μάρτιο με περιορισμένες εκροές που καλύπτουν τις ζητήσεις κατάντη, όπως δείχνει η Εικόνα 7, και έχει μικρή παραγωγή ενέργειας. Καταλήγουμε δηλαδή στο συμπέρασμα ότι προσπαθώντας να αυξήσει το διαθέσιμο υδατικό απόθεμα του έως τον Μάρτιο, πετυχαίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ωφέλιμο ύψος πτώσης, για μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα όγκου νερού και εξασφαλίζει τις αναγκαίες ποσότητες νερού, για την αρδευτική περίοδο που θα ακολουθήσει.



Εικόνα 7: Ισοζύγιο εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για το ξηρό υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 538,82GWh

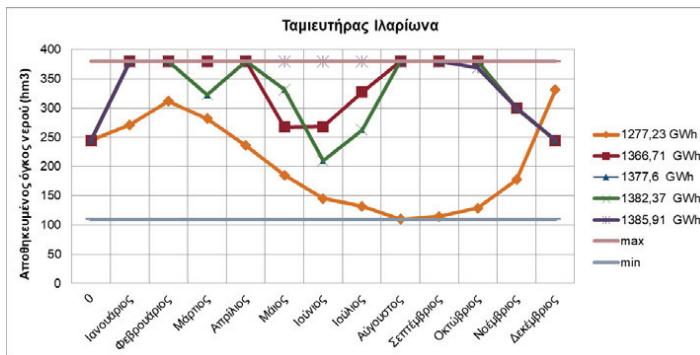
Στην κατεύθυνση της εκπλήρωσης των δύο αυτών στόχων για υψηλά αποθέματα υδάτων, συμβάλλει και η λειτουργία του ανάντη ΥΗΣ του Ιλαρίωνα, ο οποίος λειτουργεί από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο, τροφοδοτώντας τον ταμιευτήρα του Πολυφύτου. Από τον Απρίλιο και μέχρι τον Ιούλιο, ο ταμιευτήρας του Πολυφύτου αρχίζει σταδιακά να αποδεσμεύει μεγάλες ποσότητες νερού, ακριβώς για να καλύψει τις μεγάλες ζητήσεις και όχι πέρα από αυτές, παράγοντας βέβαια πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας για το σύνολο του συστήματος, με τη μέγιστη τιμή να είναι το μήνα Ιούλιο, ενώ το ωφέλιμο υδατικό απόθεμα του μειώνεται ανάλογα, για να φτάσει στην ελάχιστη τιμή τον Αύγουστο. Τον Νοέμβριο έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας για τον ΥΗΣ του Πολυφύτου, καθώς και για το σύνολο του συστήματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Κατανομή της συνολικής παραγωγής του συστήματος των ταμιευτήρων στον Αλιάκμονα ποταμό για το ξηρό υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 538,82GWh

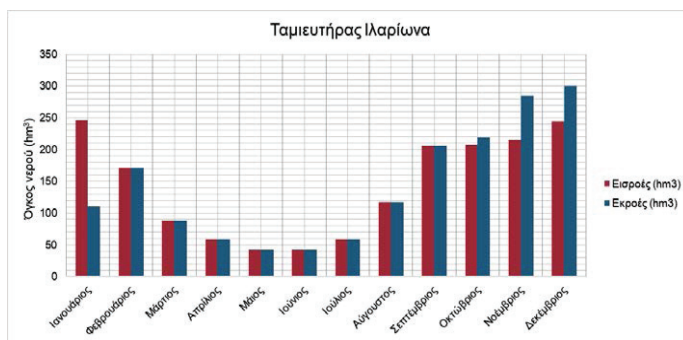
3.3.2. Δεύτερο σενάριο: λειτουργία του συστήματος ταμιευτήρων σε μέσες υδρολογικές συνθήκες

Στο σενάριο των μέσων υδρολογικών συνθηκών σε χρονικό ορίζοντα ενός έτους, η συνολική ετήσια καθαρή φυσική εισροή νερού στο σύστημα του ποταμού υπολογίστηκε σε 2.072,18 hm³. Η μέγιστη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, όπως προσεγγίστηκε από τον ΓΑ, ικανοποιώντας αυστηρά την τήρηση των όλων των δεσμεύσεων για την κάλυψη των υπόλοιπων χρήσεων νερού, ήταν για το συγκεκριμένο σενάριο 1.385,19 GWh.



Εικόνα 9: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το μέσο υδρολογικό σενάριο

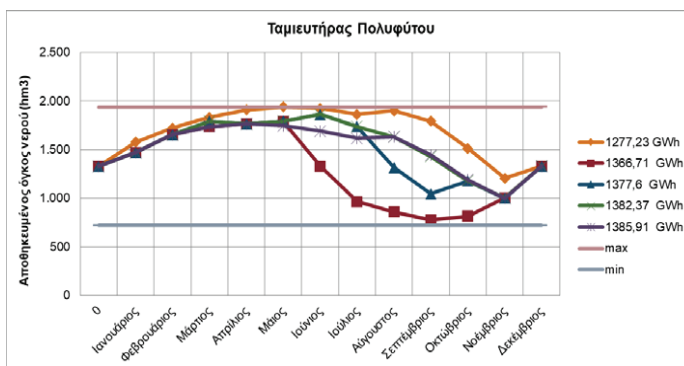
Από το διάγραμμα της Εικόνας 9, συμπεραίνουμε ότι η καλύτερη πολιτική σε σχέση με τις υπόλοιπες που προσέγγισε ο ΓΑ είναι να διατηρείται υψηλά η στάθμη του ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα, ώστε να είναι στο μέγιστο το διαθέσιμο ωφέλιμο ύψος πτώσης στον ΥΗΣ και να εκκρουν όλες οι εισροές που δέχεται, ακολουθώντας την κατανομή τους από τον Φεβρουάριο έως τον Σεπτέμβριο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Ισοζύγιο εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για το μέσο υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.385,91GWh

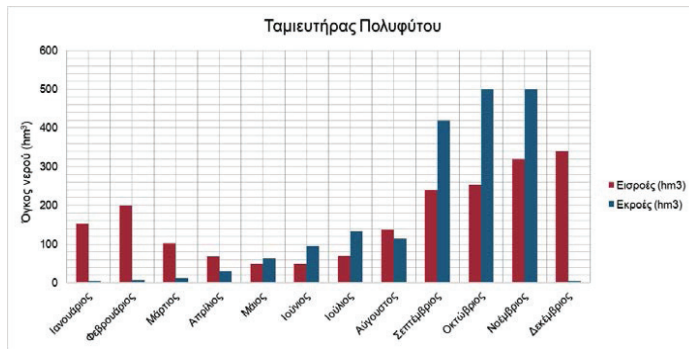
Παρατηρούμε επίσης, ότι η καμπύλη λειτουργίας του παραμένει σταθερή, στο ανώτερο όριο στάθμης και δεν επηρεάζεται από την έναρξη της αρδευτικής περιόδου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πολιτική λειτουργίας του ΓΑ έχει ρυθμίσει το σύστημα έτσι ώστε να καλύπτονται όλες οι ζητήσεις, χωρίς να απαιτείται ο ταμιευτήρας του Ιλαρίωνα να τροφοδοτήσει τον Πολυφύτο με δικό του απόθεμα, πλέον των φυσικών εισροών που δέχεται. Για τον λόγο αυτό και δεν εμφανίζεται στην Εικόνα 9 το βύθισμα στην καμπύλη λειτουργίας τους μήνες αιχμής της αρδευτικής περιόδου, που είχαμε στο προηγούμενο σενάριο της ξηράς περιόδου.

Σε ό,τι αφορά τον ταμιευτήρα του Πολυφύτου, είναι ευδιάκριτο στην Εικόνα 11 ότι όλες οι καμπύλες των πολιτικών λειτουργίας που προέκυψαν από τον ΓΑ είναι παρόμοιες από την αρχή του έτους έως το μήνα Μάιο. Από τον Μάιο και μετά, έως το τέλος του έτους, τα κοίλα των καμπυλών, δηλαδή ο ρυθμός αποφόρτισης του ταμιευτήρα, είναι αντίθετα μεταξύ τους. Σε όλες δηλαδή της λύσεις ο ταμιευτήρας αυξάνει τα υδατικά αποθέματα τους πέντε πρώτους μήνες, περιορίζοντας τις εκροές στις υποχρεωτικές λόγω των ζητήσεων. Η πιθανή βέλτιστη λύση που έδωσε ο ΓΑ οδηγεί τον ταμιευτήρα του Πολυφύτου, να διαθέτει το μέγιστο απόθεμα υδάτων τον Απρίλιο.



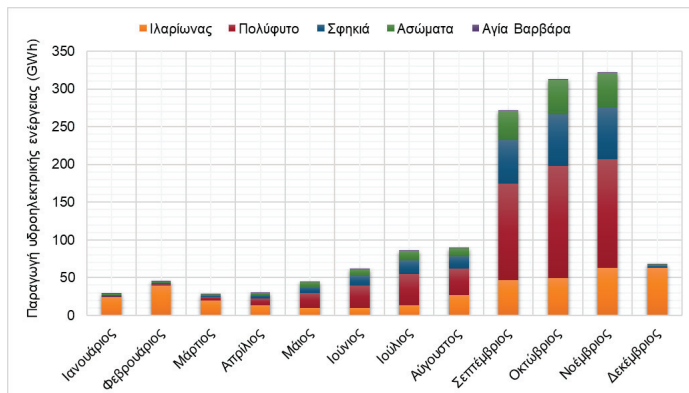
Εικόνα 11: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το μέσο υδρολογικά σενάριο

Με βάση αυτή την πολιτική λειτουργίας, ο ΥΗΣ του Πολυφύτου λειτουργεί σε ελάχιστα επίπεδα από τον Ιανουάριο μέχρι τον Μάρτιο, με περιορισμένες εκροές, όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 12 και μικρή παραγωγή ενέργειας, αυξάνοντας το διαθέσιμο υδατικό απόθεμα του έως τον Απρίλιο. Από τον Μάιο έως και τον Αύγουστο, λειτουργεί για να διοχετεύσει τις απαραίτητες μόνο υδατικές ποσότητες για να καλυφθούν οι αυξημένες ζητήσεις της αρδευτικής περιόδου, ώστε να μην μειωθεί περαιτέρω η στάθμη του και υποβαθμιστεί ενεργειακά το υδατικό του δυναμικό.



Εικόνα 12: Ισοζύγιο εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για το μέσο υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.385,91GWh

Κατά το μήνα Σεπτέμβριο έχουμε εντατικοποίηση της λειτουργίας του σταθμού, η οποία διαρκεί μέχρι και το Νοέμβριο, διοχετεύοντας μεγάλες ποσότητες υδάτων για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Το Δεκέμβριο ο σταθμός περιορίζει την λειτουργία του στο ελάχιστο, ώστε με το πλεόνασμα των εισροών που δέχεται ο ταμιευτήρας του Πολυφύτου, να επιτυγχάνεται το επιθυμητό τελικό απόθεμα του στο τέλος του έτους.

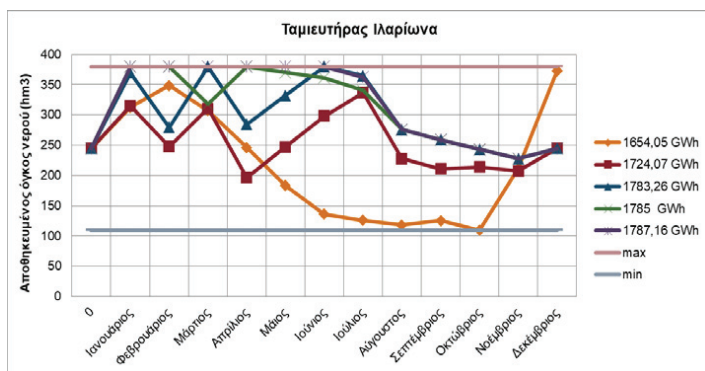


Εικόνα 13: Κατανομή της συνολικής παραγωγής του συστήματος των ταμιευτήρων στον Αλιάκμονα ποταμό για το μέσο υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.385,91GWh

3.3.3. Τρίτο σενάριο: λειτουργία του συστήματος ταμιευτήρων σε υγρές υδρολογικές συνθήκες

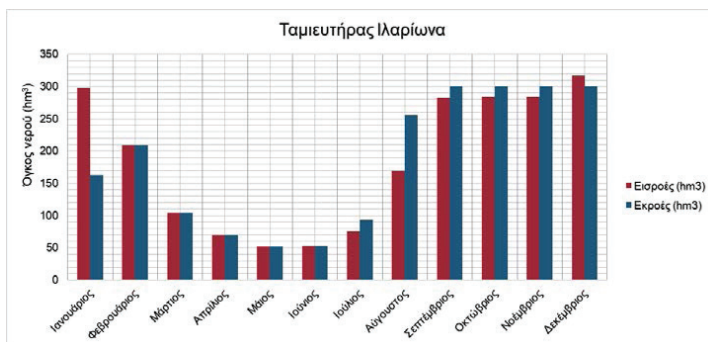
Στο σενάριο των υγρών υδρολογικών συνθηκών σε χρονικό ορίζοντα ενός έτους, η συνολική ετήσια καθαρή φυσική εισροή νερού στο σύστημα του ποταμού ανέρχεται σε 2.681,32 hm³. Η μέγιστη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίστηκε από τον ΓΑ, ικανοποιώντας αυστηρά την τήρηση όλων των δεσμεύσεων για την κάλυψη των υπόλοιπων χρήσεων νερού, ήταν για το συγκεκριμένο σενάριο στα 1.787,16 GWh, με τη μόνη διαφορά στα δεδομένα να είναι ότι η ζήτηση για την άρδευση των πεδιάδων της Θεσσαλονίκης-Λαγκαδά ορίστηκε στα 500 hm³/έτος.

Εξετάζοντας το διάγραμμα της Εικόνας 14 με τα αποτελέσματα του ΓΑ για τον ταμιευτήρα του Ιακρίωνας, προκύπτει ότι υπάρχει πάλι μια τάση η καμπύλη λειτουργίας να πλησιάζει προς το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο μέχρι και τον Ιούνιο. Μόλις πληρωθεί πλήρως ο ταμιευτήρας τον Ιανουάριο, λειτουργεί μέχρι τον Ιούνιο συνεχώς στα μέγιστα επίπεδα αποθηκευμένου όγκου, με τις εκροές από τον ΥΗΣ να ταυτίζονται κάθε μήνα με τις εισροές, όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 15. Έτσι λόγω του υψηλού δυναμικού του στην μέγιστη στάθμη, παράγει αξιόλογα ποσά ενέργειας, με μειωτική τάση προς τους καλοκαιρινούς μήνες.



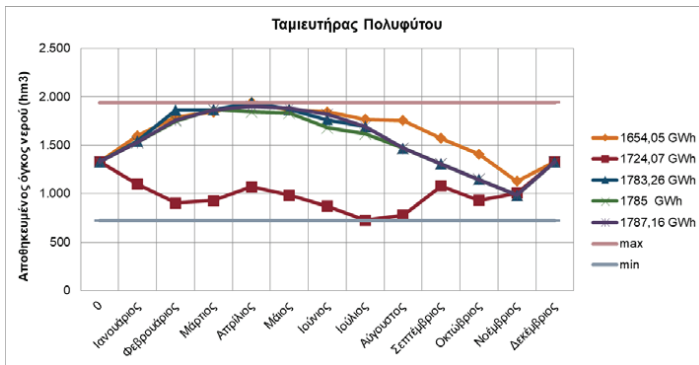
Εικόνα 14: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το υγρό υδρολογικό σενάριο

Από τον Ιούλιο έως και τον Νοέμβριο ο ταμιευτήρας αποφορτίζεται απότομα, με μεγάλη εκροή τον Αύγουστο και στη συνέχεια τους μήνες από Οκτώβριο έως Δεκέμβριο, λειτουργεί στο μέγιστο όριο της παροχρητευτικότητας του ΥΗΣ, παράγοντας την μέγιστη δυνατή ενέργεια σύμφωνα με την Εικόνα 18. Τον Νοέμβριο η στάθμη στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα έχει υποχωρήσει αρκετά λόγω της εντακτικής λειτουργίας του ΥΗΣ και βρίσκεται λίγο χαμηλότερα σε σχέση με την αρχική κατάστασή της, οπότε αποθηκεύει μέρος των εισροών για να επανέλθει το επιθυμητό αποτέλεσμα του τελικού όγκου-στόχου.

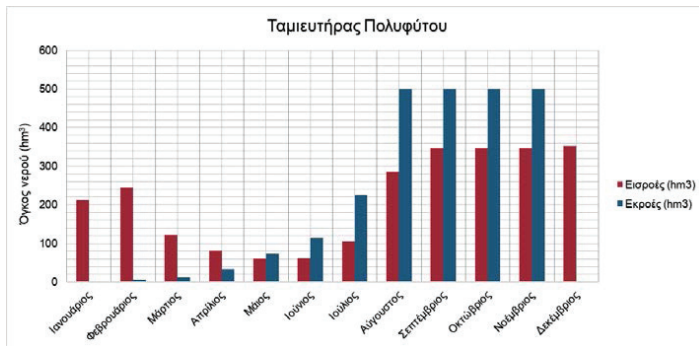


Εικόνα 15: Ισοζύγιο εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα για το υγρό υδρολογικό σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.787,16GWh

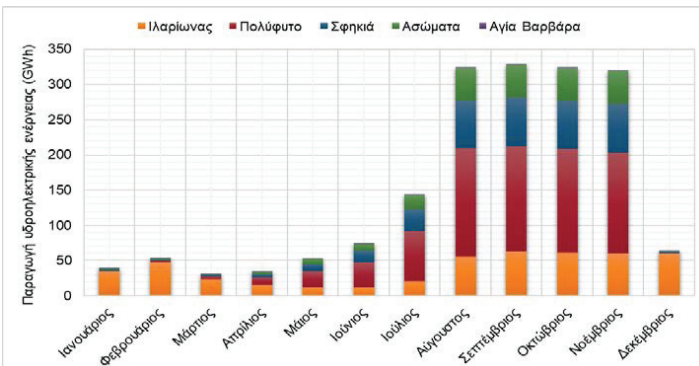
Για τον ταμιευτήρα του Πολυφύτου, οι καμπύλες των πολιτικών λειτουργίας που προσέγγισε ο ΓΑ και εμφανίζονται στην Εικόνα 16, έχουν συγκλίνει μεταξύ τους και παρουσιάζουν παρόμοιο προφίλ, εκτός από μία. Με βάση την πιθανή βέλτιστη πολιτική λειτουργίας, ο ΥΗΣ του λειτουργεί ελάχιστα με περιορισμένες εκροές από τον Ιανουάριο έως τον Απρίλιο και παράγει πολύ μικρές, για το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος του, ποσότητες ενέργειας όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 17. Με αυτή την πολιτική λειτουργίας, αυξάνεται το υδατικό του απόθεμα στο μέγιστο επίπεδο τον Απρίλιο, καθώς και η διαθέσιμη ειδική ενέργεια ανά μονάδα όγκου νερού. Από τον Μάιο μέχρι και τον Ιούλιο αρχίζει σταδιακά να αποδεσμεύει με αυξητικό ρυθμό σημαντικές ποσότητες νερού, με το διαθέσιμο υδατικό του απόθεμα όμως να παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Από τον Αύγουστο έως και τον Νοέμβριο ο ταμιευτήρας του Πολυφύτου εκμεταλλεύεται όλο το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό και τη μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ του και λειτουργεί με παροχή ίση με το μέγιστο όριο της παροχρητευτικότητας του ΥΗΣ, παράγοντας πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 18. Λόγω του μεγάλου βαθμού εκμετάλλευσης του σταθμού, ο ταμιευτήρας αποφορτίζεται διαρκώς με σταθερό περίπου ρυθμό, για να φτάσει η στάθμη του στο χαμηλότερο επίπεδο όλου του έτους τον Νοέμβριο. Το Δεκέμβριο ο ΥΗΣ του Πολυφύτου υπολειτουργεί, και με τις εισροές που δέχεται από τον ΥΗΣ του Ιλαρίωνα, η στάθμη του αυξάνεται και το υδατικό του απόθεμα συγκλίνει στον τελικό όγκο-στόχο.



Εικόνα 16: Διακύμανση του αποθηκευμένου όγκου νερού στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για τις διάφορες πολιτικές λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου για το υγρό υδρολογικά σενάριο



Εικόνα 17: Ισοζύγιο εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου για το υγρό υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.787,16GWh



Εικόνα 18: Κατανομή της συνολικής παραγωγής του συστήματος των ταμιευτήρων στον Αλιάκμονα ποταμό για το υγρό υδρολογικά σενάριο και για την πολιτική λειτουργίας με την μεγαλύτερη υδροηλεκτρική παραγωγή των 1.787,16GWh

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη, στο πολυσύνθετο σύστημα ταμιευτήρων πολλαπλής σκοπιμότητας του ποταμού Αλιάκμονα, με στόχο την μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας για τρία υδρολογικά σενάρια ξηρών, μέσων και υγρών ετών. Από τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω της συγκέντρωσης υψηλών υδατικών αποθεμάτων στους ταμιευτήρες πριν από την έναρξη της αρδευτικής περιόδου του καλοκαιριού και τον περιορισμό των εκροών στις απολύτως αναγκαίες για την κάλυψη των αναγκών στα κατάντη του ποταμού, μέχρι και τον μήνα Αύγουστο. Από τον Σεπτέμβριο και ως το τέλος του έτους, οι δυνατότητες του συστήματος για παραγωγή ενέργειας είναι πολύ μεγάλες και πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Από τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας στα τρία σενάρια που εξετάστηκαν, διαπιστώσαμε ότι για να μεγιστοποιηθεί το συνολικό όφελος, το σύστημα έχει την τάση από την αρχή του έτους να πληρώσει τον ταμιευτήρα του Ιλαρίωνα και να διατηρήσει υψηλά τη στάθμη του, για όσο χρόνο του επιτρέπουν οι περιορισμοί του. Μας οδηγεί δηλαδή στο συμπέρασμα ότι ο ταμιευτήρας του Ιλαρίωνα επηρεάζει σημαντικά το όφελος και πρέπει να έχει συνεχώς υψηλά επίπεδα υδατικού αποθέματος, καθώς αποτελεί την κεφαλή του συστήματος. Ο ταμιευτήρας του Πολυφύτου, λόγω του μεγάλου ωφέλιμου όγκου του και της υψηλής ειδικής ενέργειας που τον χαρακτηρίζει, είναι ο κύριος παραγωγός ενέργειας του συστήματος και επιβάλλεται, όσο πιο άνυδρο αναμένεται το υδρολογικό έτος, τόσο πιο νωρίς να πετυχαίνει υψηλά επίπεδα αποθέματος. Τέλος, από την επίλυση του συγκεκριμένου μη γραμμικού προβλήματος, διαπιστώσαμε ότι παρότι ο χώρος αναζήτησης των λύσεων εμφάνιζε πολλά τοπικά ακρότατα, η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων απέδωσε πολύ καλά αποτελέσματα και εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Holland, J. H., 1975, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [2] Katsifarakis, K.L., 2012, "Hydrology, Hydraulics and Water Resources Management: A Heuristic Optimization Approach," WIT Press.
- [3] East, V. and Hall, M. J., 1994, "Water resources system optimization using genetic algorithms". Proc., 1st Int. Conf. On Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225–231.
- [4] Oliveira, R. and Loucks, D. P. 1997, "Operating rules for multireservoir systems," Water Resources. Research, Vol. 33, No. 4, pp. 839–852.
- [5] Wardlaw, R. and Sharif, M., 1999, "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 125, No. 1, pp. 25–33.
- [6] Onur Hınçal, Burcu Altan-Sakarya, A. Metin Ger, 2011, "Optimization of multireservoir systems by genetic algorithm", Water Resources Management Vol.25, pp.1465-1487.
- [7] Ιωάννης Αργυράκης, 2016, "Η υδροηλεκτρική παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε.", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, "Ενέργεια: Σημερινή εικόνα – Σχεδιασμός – Προοπτικές".
- [8] Διεύθυνση Υδάτων Κεντρικής Μακεδονίας, Κοινές Αποφάσεις Γενικών Γραμματέων Αποκεντρωμένων Διοικήσεων Μακεδονίας- Θράκης και Ηπείρου – Δυτικής Μακεδονίας, 2012-2017, "Ρυθμιστικά μέτρα για τη διαχείριση των υδάτων του ποταμού Αλιάκμονα, κατάντη του φράγματος Πολυφύτου."

ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Ανδρέας Ανδρουτσόπουλος^{1*}, Αλέξανδρος Χαραλαμπίδης², Κυριάκος Κτωρίδης³, Ole Michael Jensen⁴

¹Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ),
19 χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι, Ελλάδα

²Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο
Κύπρου, Αρχιεπισκόπου Κυπριανού 30, 3036 Λεμεσός, Κύπρος

³ENERMAP, Λεωφ. Προδρόμου 121, 2064 Στρόβολος, Λευκωσία, Κύπρος

⁴Τμήμα Ενέργειας και Κτιρίων, Πανεπιστήμιο του Aalborg, Lautrupvej 2, 2750
Ballerup, Δανία

e-mail: aandr@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια είναι μονόδρομος για όλη την Ευρώπη και έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί οι οποίοι προωθούν τις επεμβάσεις σε κτίρια με ιδιαίτερα ενεργειακά αποδοτικά προϊόντα και συστήματα. Παράλληλα, έχουν νομοθετηθεί αυστηρές απαιτήσεις για τα νέα και ριζικώς ανακαινιζόμενα κτίρια προκειμένου αυτά να έχουν ιδιαίτερα χαμηλές ενεργειακές ανάγκες σε επίπεδο θέρμανσης, ψύξης, παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, αερισμού και φωτισμού. Ο δε συνδυασμός της βέλτιστης ενεργειακής παρέμβασης με την υψηλότερη απόδοση και το χαμηλότερο κόστος είναι το ζητούμενο των τελευταίων ετών. Το σημείο αυτό αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας η οποία παρουσιάζει ένα εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων σχετικά με στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης και τη χρηματοδότηση της ριζικής ανακαίνισης στα κτίρια. Σκοπός του εργαλείου είναι να αναλύει τα χρηματοδοτικά εργαλεία και κίνητρα για τις ενεργειακές ανακαινίσεις σε μια περιοχή, καθώς και άλλους εξωγενείς παράγοντες (π.χ. επίπεδα θορύβου στην περιοχή), και σε συνεργασία με τη γνώση των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, να παρέχει μια συνολική αξιολόγηση των επενδυτικών ευκαιριών για ενεργειακές ανακαινίσεις κτιρίων. Στην τελική του μορφή το εργαλείο αυτό είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο με φιλική για το χρήστη μορφή και διαδραστική απεικόνιση χάρτη επιλογής των δυνατοτήτων ριζικής ανακαίνισης κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες από διάφορες χώρες της Ευρώπης.

Η εργασία περιγράφει την αρχιτεκτονική του εργαλείου, το σχεδιασμό και την εμφάνισή του και αναλύει τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη ούτως ώστε να οδηγήσουν στη βέλτιστη επιλογή αναβάθμισης ενός κτιρίου βάσει ενεργειακών, επενδυτικών και άλλων κριτηρίων.

Λέξεις Κλειδιά: κτίρια, ενεργειακή ανακαίνιση, διαδικτυακό εργαλείο, υποστήριξη επενδύσεων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια έχει δοθεί μεγάλη ώθηση στην ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων πανευρωπαϊκά. Έτσι, τα νέα κτίρια πρέπει να συμμορφώνονται με τις ελάχιστες απαιτήσεις ενέργειας για την ενεργειακή απόδοσή τους καθώς και τα υφιστάμενα κτίρια που υποβάλλονται σε ριζική ενεργειακή ανακαίνιση [1, 2]. Τα παλαιότερα όμως κτίρια εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικούς καταναλωτές ενέργειας καθώς τα ποσοστά ανακαινίσεών τους προχωρούν με μικρά βήματα, παρόλο που έχουν ξεκινήσει πολλές πρωτοβουλίες προκειμένου να βοηθηθεί η ανακαίνιση των κτιρίων και να αποκτήσει περαιτέρω δυναμική. Ειδικά ο οικιστικός τομέας που αντιπροσωπεύει το μεγάλο μερίδιο του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος με ποσοστό της τάξεως του 79% στην Ελλάδα [3] είναι δύσκολο να αντιμετωπιστεί, μεταξύ άλλων λόγω των υφιστάμενων μισθώσεων και των νόμων περί συγκυριαρχίας. Τα κτίρια που ανήκουν σε δημόσιους φορείς αποτελούν μια άλλη πρόκληση καθώς σχετίζονται με το δημόσιο χρέος και συνεπώς επηρεάζουν και τις επενδύσεις βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Επιπρόσθετα, σε πολλά κτίρια, η καθυστέρηση στη συντήρηση και επισκευή τους είναι ένα σοβαρό ζήτημα που παρεμποδίζει τις προσπάθειες ενεργειακής απόδοσης. Τα παραδείγματα αυτά δείχνουν ότι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου είναι ένα πολύπλοκο εγχείρημα και απαιτούνται πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για να υποστηριχθεί και να γίνει ελκτική μια τέτοιου είδους ανακαίνιση. Επί του παρόντος, περίπου το 35% των κτιρίων της ΕΕ είναι άνω των 50 ετών και συνεπώς αντιπροσωπεύουν σημαντικό δυναμικό για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂.

Με την εφαρμογή της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ [2] σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, καθορίστηκαν οι απαιτήσεις και διαδικασίες υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσής τους (ΠΕΑ) και άρχισαν σε μαζικό επίπεδο, να συλλέγονται ενεργειακά στοιχεία για τις καταναλώσεις τους. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένας μεγάλος αριθμός ΠΕΑ και δεδομένων τους σχετικών με την οικοδομική δραστηριότητα, αν και δεν είναι όλα διαθέσιμα σε κάθε κράτος μέλος. Σε ορισμένες χώρες ισχύουν αυστηροί κανόνες προστασίας προσωπικών δεδομένων και τα ΠΕΑ δεν δημοσιεύονται καθόλου. Μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο από τον ιδιοκτήτη, τον ενεργειακό επιθεωρητή και την υπεύθυνη αρχή. Σε άλλες χώρες, ένα μέρος του ΠΕΑ θεωρείται δημόσια πληροφορία και είναι προσβάσιμη από όλους. Υπάρχουν παραδείγματα όπως αυτό της Ιρλανδίας όπου, παρόλο υπάρχουν αυστηροί νόμοι για τα προσωπικά δεδομένα, αναπτύχθηκε μια μέθοδος όπου συγκεντρώνει δεδομένα σε μέσο αθροιστικό επίπεδο, συμμορφώνεται με τους κανόνες προστασίας προσωπικών δεδομένων και είναι επίσης κατάλληλη να παράσχει πληροφορίες σχετικά με στοιχεία σχετικά με την ενέργεια στα κτίρια και τις δυνατότητες βελτίωσης ευρύτερων περιοχών και ταυτόχρονα να τις καταστήσει χρήσιμες για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση πολιτικών ανακαίνισης [4]. Η παραπάνω προσέγγιση υποστηρίζει ένα σημαντικό στόχο της Οδηγίας, δηλαδή τη συμβολή στην ευαισθητοποίηση του κοινού όσον αφορά στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και τη στήριξη της μετατροπής της αγοράς προς την κατεύθυνση μεγαλύτερης ενεργειακής αποδοτικότητας.

Παράλληλα με τα ενεργειακά στοιχεία, υπάρχουν διαθέσιμες ανοικτές πηγές δεδομένων (open data sources) σε Ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, σχετικά με οικονομικά κοινωνικά στοιχεία οι οποίες είναι προσίτες στο ευρύ κοινό και παρατηρούνται εξελίξεις όπως η ψηφιοποίηση του κατασκευαστικού τομέα και η αυξανόμενη χρήση γεω-χωρικών δεδομένων.

Γίνεται φανερό ότι ο συνδυασμός διαφορετικών πηγών δεδομένων ανοίγει εντελώς νέες δυνατότητες για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση του δυναμικού ανακαίνισης κτιρίων καθώς και την παροχή υποστήριξης για τη λήψη αποφάσεων σε διάφορες στοχευμένες ομάδες τους. Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται ένα εργαλείο που προσπαθεί να συνδυάσει όλες τις παραπάνω πληροφορίες.

2. ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

2.1. Γενικά

Το εργαλείο ENERFUND δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου ENERFUND το οποίο έχει ως κύριο στόχο την ενίσχυση χρηματοδοτικών επενδύσεων για τη ριζική ανακαίνιση κτιρίων μέσω τριών κατευθύνσεων [5]:

1) ευαισθητοποίηση του κοινού και κτίσιμο εμπιστοσύνης προς τις επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης,

2) εντοπισμό και αξιολόγηση χρηματοδοτικών εργαλείων και κινήτρων για τις ενεργειακές ανακαινίσεις,

3) αξιολόγηση επενδυτικών ευκαιριών στον τομέα των ενεργειακών ανακαινίσεων κτιρίων.

Το ENERFUND είναι ένα εργαλείο που αξιολογεί και κατηγοριοποιεί ευκαιρίες ριζικής ανακαίνισης κτιρίων – παρόμοιο με την κατάταξη πιστοληπτικής ικανότητας που χρησιμοποιείται από τις τράπεζες για την αξιολόγηση των πελατών της.

Το εργαλείο είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο με φιλική για το χρήστη μορφή και διαδραστική απεικόνιση χάρτη επιλογής των δυνατοτήτων ριζικής ανακαίνισης κτιρίων και σκοπός του είναι να διευκολύνει τους εμπλεκόμενους φορείς στον καθορισμό στρατηγικών και λήψη αποφάσεων για τις ενεργειακές ανακαινίσεις.

Το εργαλείο απευθύνεται στους κάτωθι:

- Χρηματοπιστωτικούς οργανισμούς για τη διευκόλυνση παροχής δανείων
- Εταιρείες ανακαίνισης / παράγοντες της αγοράς: προμηθευτές, κατασκευαστές και εγκαταστάτες, πάροχοι υπηρεσιών για τον εντοπισμό οικονομικά υγιών ευκαιριών
- Τοπική Αυτοδιοίκηση – Δήμοι για την προώθηση στοχευμένων κινήτρων
- Ιδιοκτήτες και ενοικιαστές κατοικιών μέσω κατάλληλης γνώσης των δυνατοτήτων ανακαίνισης

2.2. Μεθοδολογία εργαλείου

Για τη δημιουργία του εργαλείου ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

- ❖ Καταγράφηκαν οι απαιτούμενες συνθήκες που απαιτούνται για τη διευκόλυνση της χρηματοδότησης για την ριζική ανακαίνιση των κτιρίων.
- ❖ Συλλέχθηκαν όλα τα σχετικά στοιχεία από υφιστάμενες πρωτοβουλίες και άλλες πηγές που παραθέτουν δράσεις για ριζική ανακαίνιση κτιρίων.
- ❖ Πραγματοποιήθηκε ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης όσον αφορά την χρήση των ΠΕΑ στην αγορά ακινήτων.
- ❖ Διερευνήθηκαν οι ανάγκες, τα εμπόδια και η γενική αποδοχή των ΠΕΑ καθώς και ενεργειών ανακαίνισης από την πλευρά του χρήστη.
- ❖ Έλαβαν χώρα στοχευμένες συνεντεύξεις (ερωτηματολόγια) με τα ενδιαφερόμενα μέρη σε σχέση με τις ανάγκες / προσδοκίες τους για την ανάπτυξη ενός εργαλείου για ριζική ανακαίνιση.

Στη συνέχεια

- ❖ καθορίστηκαν οι βασικές παράμετροι από τα ΠΕΑ και οι ανοικτές πηγές δεδομένων (open data sources) που θα περιληφθούν στα στοιχεία του εργαλείου και
- ❖ καθορίστηκαν όλα τα κύρια χαρακτηριστικά του εργαλείου ENERFUND βασισμένα σε κοινές πρακτικές.

Τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία που χρησιμοποιεί το εργαλείο μετά την ανάδειξή τους από πλευράς σημαντικότητας και διάθεσης είναι τα κάτωθι

1. Ενεργειακά στοιχεία

Στοιχεία αναφορικά με δεδομένα από ΠΕΑ όπως:

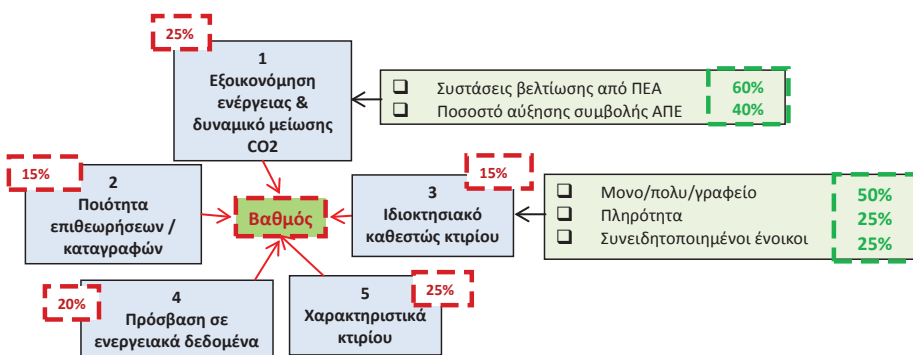
- ❖ Ενεργειακή κατηγορία
- ❖ Κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας κτιρίου
- ❖ Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας (μέσω σεναρίων των συστάσεων)
- ❖ Στοιχεία κελύφους κτιρίου
- ❖ Στοιχεία συστημάτων θέρμανσης, ψύξης

2. Γεωγραφικά στοιχεία

- ❖ Περιοχή

- ❖ Υψόμετρο
 - ❖ Τύπος κτιρίου
 - ❖ Ηλικία κτιρίου
 - ❖ Περιορισμοί δυνατοτήτων επεμβάσεων
 - ❖ Επίπεδο θορύβου
3. Κοινωνικά στοιχεία
- ❖ εισοδηματικά στοιχεία
 - ❖ Ενεργειακή φτώχεια
 - ❖ Ποσοστό πληρότητας κτιρίου
 - ❖ Ευαισθητοποίηση τοπικής κοινωνίας - ενοίκων
4. Οικονομικά στοιχεία
- ❖ Εθνικά / περιφερειακά προγράμματα ανακαίνισης κτιρίων σε εξέλιξη
 - ❖ Εθνικοί στόχοι και προγράμματα εξοικονόμησης ενέργειας
 - ❖ Υφιστάμενα προγράμματα επενδύσεων
 - ❖ Περίοδοι αποπληρωμής
5. Εκμετάλλευση τεχνολογικών εξελίξεων
- ❖ Αντλίες θερμότητας
 - ❖ Λέβητες συμπύκνωσης
 - ❖ Εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κτίρια

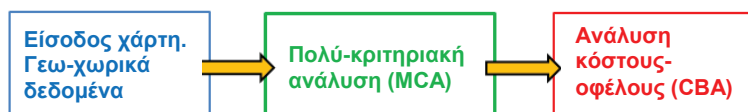
Τα παραπάνω δεδομένα ακολούθως υπόκεινται σε μια πολύ-κριτηριακή ανάλυση (MCA) προκειμένου να βαθμολογηθεί η σημασία τους. Με βάση ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων που εντοπίστηκαν, αποφασίστηκε να προσδιοριστεί ένας περιορισμένος αριθμός παραμέτρων (5) για να λειτουργήσουν ως βασικά κριτήρια. Στη συνέχεια, αποφασίστηκε ότι τα πέντε κύρια βασικά κριτήρια πρέπει να υποδιαιρεθούν σε ορισμένα υπο-κριτήρια, τα οποία προσδιορίζονται εύκολα και δύναται να λάβουν συντελεστή βαρύτητας. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργήθηκε ένας αριθμός εξωτερικών και εσωτερικών διορθωτικών συντελεστών προκειμένου να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η σημασία τόσο των κύριων κριτηρίων όσο και των υπο-κριτηρίων. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η φιλοσοφία των κριτηρίων, υπο-κριτηρίων και οι συντελεστές βαρύτητας προκειμένου να ληφθεί μια τελική βαθμολογία.



Σχήμα 1: Απλοποιημένη διαδικασία καθορισμού βαθμολογίας εργαλείου ENERFUND

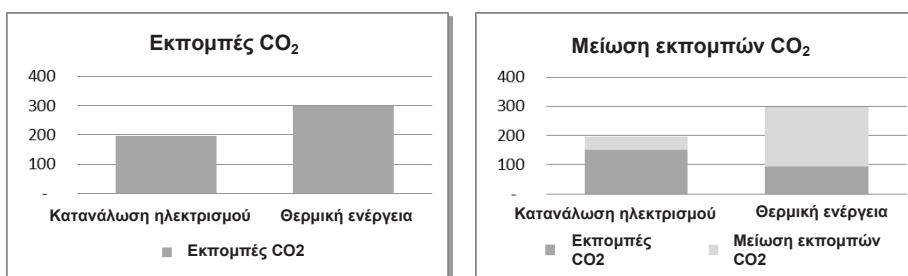
Μετά την ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων ακολουθεί ένα άλλο σημαντικό σημείο του εργαλείου, η ανάλυση κόστους οφέλους (CBA). Αυτή απαιτεί τη χρήση στοιχείων από τους χρήστες με τη μορφή

δεδομένων σχετικά με επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης. Η επένδυση ενεργειακής ανακαίνισης ενός κτιρίου θα αξιολογηθεί με βάση τα οφέλη που προκύπτουν υπό μορφή εξοικονόμησης ενέργειας και χρήματος και εν τέλει περιόδου αποπληρωμής. Στοιχεία όπως οι επιχορηγήσεις και τα μη ενεργειακά οφέλη (NEBs) μπορούν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση κόστους-οφέλους. Με αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται η σκιαγράφηση του εργαλείου ENERFUND το οποίο έχει τα κάτωθι τρία διακριτά στοιχεία (βλέπε Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Κύρια στοιχεία εργαλείου

Ακόμη ένα στοιχείο του εργαλείου θα είναι ο υπολογισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ που θα αποφεύγονται να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα λόγω συγκεκριμένων επιλεγμένων μέτρων ενεργειακής ανακαίνισης. Η εκτίμηση αυτή θα παρουσιάζεται υπό τη μορφή δύο διαγραμμάτων, από τα οποία το ένα θα δείχνει τις υφιστάμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το άλλο την πιθανή μείωσή τους (βλέπε Σχήμα 3).



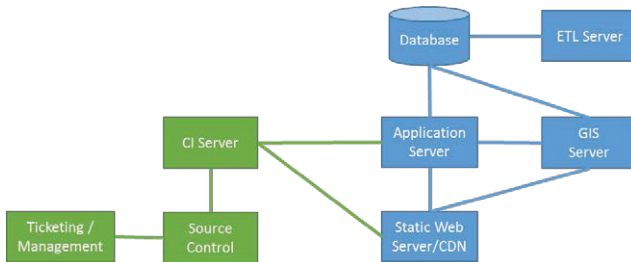
Σχήμα 3: Κατανομή επιφάνειας κτιρίου ανά χρήση

2.3. Αρχιτεκτονική

Το εργαλείο ENERFUND χωρίζεται σε στοιχεία που είναι υπεύθυνα για διαφορετικές λειτουργίες, γεγονός που παρέχει διαχωρισμό για θέματα ασφάλειας, επιτρέπει το σύστημα να μεγεθυνθεί υπό κλίμακα και δύναται να παρέχει μεγάλη διαθεσιμότητα δεδομένων. Στη φάση της ανάπτυξης, όλες οι παραπάνω λειτουργίες λαμβάνουν χώρα σε ένα μόνο υπολογιστή (θέση εργασίας) και μπορούν να χωριστούν σε πολλούς υπολογιστές εάν χρειαστεί. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα στοιχεία του εργαλείου τα οποία χωρίζονται σε στοιχεία συστήματος (μπλε χρώμα) και στοιχεία διαχείρισης (πράσινο χρώμα). Τα στοιχεία του συστήματος είναι υπεύθυνα για τη φιλοξενία της εφαρμογής ENERFUND στο διαδίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά στοιχεία συστήματος περιλαμβάνουν:

- Βάση δεδομένων: περιλαμβάνει όλα τα μεταβλητά δεδομένα στο σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των ΠΕΑ και των γεωγραφικών δεδομένων.
- ETL εξυπηρετητής (server): είναι υπεύθυνος για τη φόρτωση δεδομένων στη βάση δεδομένων από διαφορετικές πηγές.
- Διακομιστής εφαρμογής (application server): φιλοξενεί το επίπεδο server / web service της εφαρμογής.



Σχήμα 4: Στοιχεία της εφαρμογής ENERFUND

- Διακομιστής γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS server): είναι υπεύθυνος για τη φόρτωση χωρικών δεδομένων από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένης της βάσης δεδομένων ENERFUND καθώς και διακομιστών GIS τρίτων μερών και εκθέτοντας τα δεδομένα ως OGC πρότυπες υπηρεσίες δικτύου. Η εφαρμογή ENERFUND μπορεί να εκτελέσει λειτουργίες CRUD (δημιουργία, ανάγνωση, ενημέρωση, διαγραφή) στα δεδομένα αυτά.
- Στατικός διαδικτυακός διακομιστής: φιλοξενεί την εφαρμογή πελάτη. Μπορεί να διαχωριστεί από τον διακομιστή εφαρμογών για να μειώσει την πολυπλοκότητα και να φορτώσει τον διακομιστή εφαρμογών.

Τα βασικά στοιχεία διαχείρισης περιλαμβάνουν:

- Έλεγχος πηγής: υπεύθυνος για τη φιλοξενία του πηγαίου κώδικα για το εργαλείο καθώς και για την παρακολούθηση αλλαγών και εκδόσεων της πηγής.
- Ticketing / Management: επιτρέπει στην δημιουργία και διαχείριση εργασιών που σχετίζονται με την ανάπτυξη του συστήματος. Η διαχείριση των εργασιών μπορεί να γίνεται με εύστροφο τρόπο και το σύστημα ticketing πρέπει να επιτρέπει τη δημιουργία ευέλικτων πεδίων.
- Διακομιστής συνεχούς ενσωμάτωσης (C.I.): υπεύθυνος για την πραγματοποίηση αλλαγών στον έλεγχο πηγής, τις δοκιμές λειτουργίας μονάδων και την ανάπτυξη συνιστωσών του συστήματος.

Για τη δημιουργία και συνεργασία των διαφόρων στοιχείων της εφαρμογής χρησιμοποιούνται πολλά λογισμικά, περιβάλλοντα εργασίας και εφαρμογές, μερικά από τα οποία είναι: Linux, Postgresql, PostGIS, Amazon Cloudfront, Python, OGC tools, Nginx, GeoServer, Jenkins, κατπ.

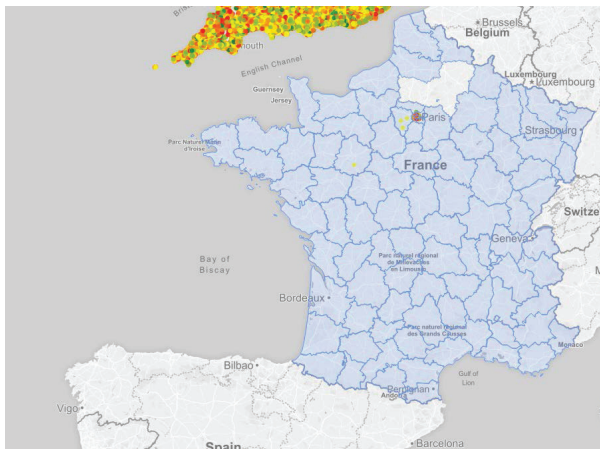
Παράλληλα, αναπτύσσεται μια βάση δεδομένων η οποία δύναται να λάβει υπόψη όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2 και αποθηκεύει βασικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο εργαλείο και καλύπτουν πολλές γεωγραφικές περιοχές. Κανονικοποιεί αυτά τα δεδομένα για να δώσει μια ενιαία τυποποιημένη προβολή για να παρέχει στο εργαλείο ένα συνεκτικό σύνολο δεδομένων. Η βάση δεδομένων έχει σχεσιακό σχεδιασμό και κάνοντας χρήση αυτού του σχεδιασμού παρέχει μια καθαρή εικόνα των δεδομένων για το εργαλείο.

2.4. Χαρακτηριστικά εργαλείου

Όπως προαναφέρθηκε, το εργαλείο στη σημερινή του μορφή, διαθέτει μια διαδραστική απεικόνιση χάρτη επιλογής κτιρίων και στοιχείων τους με σκοπό τη διευκόλυνση εύρεσης των δυνατοτήτων ριζικής ανακαίνισής τους [6]. Το εργαλείο υλοποιείται ως εφαρμογή ενιαίας σελίδας (Single Page Application), όπου η σελίδα αρχικά φορτώνεται και στη συνέχεια δυναμικά ενημερώνεται κατά την αλληλεπίδραση του χρήστη χωρίς να απαιτείται επαναφόρτωσή της. Η κύρια διεπαφή βασίζεται σε διαδραστικό χάρτη της Ευρώπης, όπου ο χρήστης μπορεί να οπτικοποιήσει τα ενεργειακά στοιχεία των κτιρίων και να τα περιορίσει με την εφαρμογή φίλτρων. Η εφαρμογή αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες. Τα κύρια επίπεδα είναι:

- ❖ Το επίπεδο χάρτη, όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την περιοχή ενδιαφέροντός του (Σχήμα 5).
- ❖ Επίπεδα ορίων διαχείρισης: Τα επίπεδα αυτά παρέχονται υπό τη μορφή πολύγωνων τα οποία έχουν φορτωθεί εκ των προτέρων στη βάση δεδομένων ξεχωριστά για κάθε μία από τις χώρες

και έχουν αντιστοιχιστεί σε επίπεδα μεγέθυνσης στο χάρτη. Το επίπεδο αυτό επιτρέπει την αλληλεπίδραση για να βοηθήσει τον χρήστη να πλοηγηθεί μέσω του χάρτη. Όταν ο χρήστης επιλέξει ένα πολύγωνο, τότε ο χάρτης μεγεθύνεται σε αυτήν την περιοχή αποκαλύπτοντας το επόμενο ιεραρχικά επίπεδο διαχείρισης και παρέχοντας περισσότερα στοιχεία.



Σχήμα 5: Διαδραστικός χάρτης εργαλείου

- ❖ Το διαδραστικό επίπεδο κτιρίων: Το επίπεδο αυτό εμφανίζεται μόνο όταν ο χρήστης φτάσει στο μέγιστο βαθμό μεγέθυνσης στο χάρτη. Σε αυτό το σημείο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεμονωμένα κτίρια για να αλληλεπιδράσει μαζί τους.
- ❖ Εφαρμογή φίλτρων χρήστη: Τα φίλτρα ενεργοποιούνται σε ξεχωριστό παράθυρο στη δεξιά πλευρά του χάρτη και παρέχουν επιλογές στο χρήστη για να αναζητήσει στοιχεία για την ενεργειακή κατάσταση ενός κτιρίου και το δυναμικό ενεργειακής αναβάθμισής του. Ανάλογα με τα δεδομένα που υπάρχουν για μια περιοχή/ χώρα, διαμορφώνεται η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών φίλτρων.

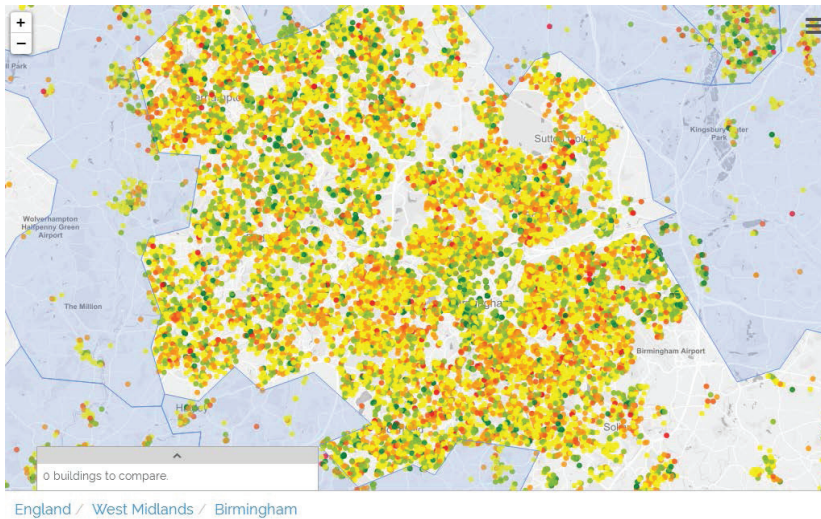
Με τη πλοήγηση στο εργαλείο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξειδικεύσει την αναζητήσή του σε συγκεκριμένη περιοχή λαμβάνοντας άμεσα στοιχεία αναφορικά με τον αριθμό των κτιρίων και την ενεργειακή τους κατηγορία (βλέπε Σχήμα 6). Η ενεργειακή κατηγορία είναι αποτυπωμένη χρωματικά, με βαθύ πράσινο για την καλύτερη (A+ ή A) η οποία σταδιακά μετατρέπεται σε κόκκινο για την χειρότερη κατηγορία (π.χ. G). Παράλληλα, στο κάτω αριστερό μέρος της οθόνης δίδονται στοιχεία για την περιοχή (Σχήμα 6).

Η μπάρα επιλογών του εργαλείου (βλέπε Σχήμα 7) επιτρέπει στο χρήστη να εκμεταλλευτεί πολλά στοιχεία για τα κτίρια που απεικονίζονται στο χάρτη παρέχοντάς του πληροφορίες, ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα της περιοχής, αναφορικά με:

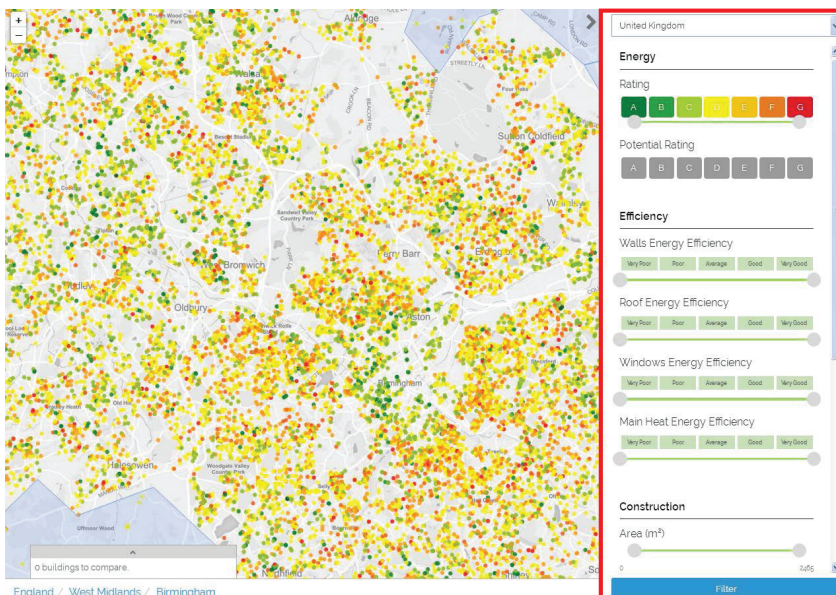
- την ενεργειακή κατηγορία
- το δυναμικό βελτίωσης της ενεργειακής κατηγορίας
- τη συνολική επιφάνεια
- την ενεργειακή απόδοση της τοιχοποιίας
- την ενεργειακή απόδοση της οροφής
- την ενεργειακή απόδοση των κουφωμάτων
- την απόδοση του συστήματος θέρμανσης

Ο χρήστης μπορεί εύκολα να επιλέξει τα κριτήριά του και μέσω του φιλτραρίσματος, άμεσα να δει τα αποτελέσματα. Στο ίδιο μενού παραθέτονται μια σειρά από πληροφορίες αναφορικά με κοινωνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της περιοχής/ χώρας. Τα στοιχεία αυτά είναι: η ευκολία απόκτησης μιας

οικοδομικής άδειας, ευκολία ηλεκτροδότησης μιας κατασκευής, ευκολία εγγραφής μιας ιδιοκτησίας στην πολεοδομία, ευκολία εμπορικής δραστηριότητας στο εξωτερικό, ευκολία απόκτησης πίστωσης, ευκολία επιβολής συμβολαιογραφικών πράξεων, ευκολία πληρωμής φόρων, δυνατότητα προστασίας των μικρών επενδυτών, ευκολία στην έναρξη μιας επιχείρησης και ευκολία επίλυσης θεμάτων αφερεγγυότητας.



Σχήμα 6: Επιλογή περιοχής χάρτη



Σχήμα 7: Μπάρα πολλαπλών επιλογών εργαλείου

Μια ακόμα δυνατότητα του εργαλείου είναι η σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων κτιρίων. Γίνεται επιλογή των κτιρίων από το χάρτη και στη συνέχεια, σε ένα ξεχωριστό παράθυρο, εμφανίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισής τους (Σχήμα 8). Στα στοιχεία αυτά αναφέρονται το είδος του κτιρίου, η ενεργειακή του κατηγορία, η επιφάνεια δαπέδου του (m²), ο αριθμός δωματίων, η ενεργειακή απόδοση των στοιχείων κελύφους, των κουφωμάτων του, κ.α.π.

Local Authority	Sandwell	Local Authority	Sandwell
Post Code	B69 3DW	Post Code	B69 3HA
Address	84, Dudley Road	Address	39, Salop Street
Property Type	House	Property Type	Flat
Energy Rating	E	Energy Rating	E
Potential Energy Rating	E	Potential Energy Rating	C
Total floor area	107m ²	Total floor area	25m ²
# for Rooms	4	# for Rooms	2
Windows Energy Efficiency	3	Windows Energy Efficiency	3
Walls Energy Efficiency	1	Walls Energy Efficiency	3
Roof Energy Efficiency	1	Roof Energy Efficiency	4
Main Heat Energy Efficiency	4	Main Heat Energy Efficiency	2
Country	United Kingdom	Country	United Kingdom

Σχήμα 8: Εφαρμογή σύγκρισης κτιρίων

Με την παραπάνω διαδικασία μπορούν εύκολα και γρήγορα να βρεθούν πληροφορίες για το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα ενδιαφέροντος: από ένα επίπεδο κτιρίου, οικοδομικού τετραγώνου, σε ένα επίπεδο περιοχής, πόλης, χώρας και να αναδειχθούν ευκαιρίες ενεργειακής ανακαίνισης κτιρίων βάσει και οικονομικών κριτηρίων.

Οι πληροφορίες στο χάρτη βρίσκονται σε φάση εμπλουτισμού με στοιχεία από νέες χώρες καθώς και ενσωμάτωσης επιπρόσθετων στοιχείων για κτίρια που έχουν εισαχθεί. Τα κάτωθι στοιχεία λαμβάνουν την υψηλότερη βαρύτητα:

- Ενεργειακή κατηγορία
- Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα
- Συνολική επιφάνεια
- Συντελεστές θερμοπερατότητας του κτιριακού κελύφους
- Είδη καυσίμου / πηγές
- Απόδοση συστημάτων θέρμανσης
- Συμβολή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Είδος κυριότητας κτιρίου (ιδιωτικό/ δημόσιο)
- Μέσες τιμές πώλησης/ ενοίκιασης ακινήτων

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το εργαλείο που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία αποσκοπεί στην διευκόλυνση λήψης αποφάσεων αναφορικά με την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων. Για τη δημιουργία του χρησιμοποιήθηκε μεγάλος όγκος δεδομένων από διαφορετικές πηγές και διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως ενεργειακά στοιχεία από ΠΕΑ, γεωγραφικά στοιχεία, οικονομικά στοιχεία σχετικά με χρηματοδοτικά προγράμματα ενίσχυσης δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια τιμές καυσίμων, κοινωνικά στοιχεία όπως θέματα ενεργειακής φτώχειας, με σκοπό ο χρήστης να συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες για τη δυνατότητα λήψης μέτρων ενεργειακής βελτίωσης των υφιστάμενων κτιρίων.

Το εργαλείο διαθέτει φιλική επιφάνεια εργασίας (χάρτης επιλογών κτιρίων), μια ιδιαίτερα εύκολη στη χρήση επιφάνεια πολλαπλών επιλογών και μέσω διαδραστικής επικοινωνίας επιτρέπει στο χρήστη να λαμβάνει αποτελέσματα σχετικά με τις πλέον αποτελεσματικές λύσεις ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων βάσει ενεργειακών και επενδυτικών κριτηρίων.

Το εργαλείο προσφέρει ενεργειακά στοιχεία για ένα κτίριο, οικοδομικό τετράγωνο, περιοχή, πόλη, δηνητικά έως και χώρα καθώς και τη δυνατότητα βελτίωσης των ενεργειακών τους αναγκών με τη χρήση διάφορων επιλογών, πληροφορεί για μια σειρά οικονομικών και κοινωνικών στοιχείων και παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης κτιρίων μεταξύ τους.

Το συγκεκριμένο εργαλείο έχει τη δυνατότητα εύκολης αναβάθμισης, εισαγωγής νέων δεδομένων και εμπλουτισμού υφιστάμενων ούτως ώστε να ενσωματώσει τα αντίστοιχα δεδομένα όλων των Ευρωπαϊκών κρατών και να αποτελέσει μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων και ένα χρήσιμο μέσο που θα συμβάλλει στην κατεύθυνση της ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτίρια σύμφωνα με τις οδηγίες και τους στόχους της ΕΕ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το εργαλείο ENERFUND που παρουσιάστηκε αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου «ENERFUND – An ENERgy Retrofit FUNDing tool» το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο του προγράμματος Ορίζοντα 2020 (αρ. συμβολαίου: 695873).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οδηγία 2002/91/ ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων [ΕΕ L 1).
- [2] Οδηγία 2010/31/ ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (αναδιατύπωση) [ΕΕ L 153).
- [3] Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2015, «Απογραφή κτιρίων 2011», μέσω ιστοσελίδας <http://www.statistics.gr/el/census-buildings-2011>.
- [4] Πιλοτική εφαρμογή Ιρλανδίας: <http://energyaction.ie/wp/projects/ieee-projects/> και Ευρωπαϊκό έργο EPISCOPE: <http://episcope.eu/index.php?id=97>.
- [5] An ENERgy Retrofit FUNDing tool, <http://enerfund.eu/>
- [6] <http://app.enerfund.eu/>

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μαρία Μπολολιά^{1*}, Κατερίνα Σφακιανάκη², Ανδρέας Ανδρουτσόπουλος¹

¹Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ),
19 χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι

²Τμήμα Μελετών Αναπτυξιακών Έργων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών &
Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 19 χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι
e-mail: mbolo@cres.gr, katsfak@cres.gr, aandr@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των υφιστάμενων κτιρίων αποτελεί προτεραιότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κατά συνέπεια της χώρας μας, τις τελευταίες δεκαετίες. Η πλειοψηφία των κτιρίων, κυρίως λόγω παλαιότητας, χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας.

Οι βέλτιστου κόστους αποδοτικές λύσεις ενεργειακής αναβάθμισης του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος είναι το κύριο ζητούμενο για τις χώρες της Ευρώπης αλλά και διεθνώς. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη και χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος που προωθεί την ενεργειακή ανακαίνιση των κτιρίων σε Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (nZEB). Το εργαλείο έχει επικεντρωθεί σε αντιπροσωπευτικά κτίρια του δημοσίου με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης ενεργειακής κατάστασης τους και τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών και ταυτόχρονα οικονομικά βιώσιμων λύσεων, για την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη μέγιστη δυνατή μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το πρόγραμμα αξιολογεί με αρχές βέλτιστου κόστους και παρέχει πακέτα μέτρων για το συγκεκριμένο κτίριο προκειμένου αυτό να πληροί τα κριτήρια των κτιρίων nZEB.

Στην εργασία παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού προγράμματος, η μεθοδολογία υπολογισμών και τα αποτελέσματα, ενώ γίνεται χρήση του εργαλείου σε ένα δημόσιο κτίριο γραφείων στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη βέλτιστη επιλογή σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης τόσο από ενεργειακής άποψης όσο και από επενδυτικής. Επιπρόσθετα, γίνεται σύγκριση της μελέτης εφαρμογής κάνοντας χρήση του εργαλείου με το εθνικό πρόγραμμα υπολογισμού της ενεργειακής επίδοσης ΤΕΕ ΚΕνΑΚ.

Λέξεις Κλειδιά: nZEB, ενεργειακή ανακαίνιση, κτίρια, υπολογιστικό εργαλείο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτίρια της Ευρώπης αποτελεί κύριο στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία με σειρά πρωτοβουλιών και προτροπών προσπαθεί να τον επιτύχει. Οι ενεργειακές ανάγκες της ηπείρου είναι μεγάλες και μόνο με δεσμευτικά μέτρα στα κράτη μέλη της μπορούν μειωθούν. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας έχουν δημοσιοποιηθεί πακέτα μέτρων για τη μείωση της κατανάλωσης των κτιρίων, όπως αυτό της Καθαρής ενέργειας για όλους τους Ευρωπαίους [1]. Με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ μπήκαν οι βάσεις για την κατασκευή ιδιαίτερα αποδοτικών από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας κτιρίων σε όλα τα Κ-Μ [2]. Με τη βοήθεια του Κανονισμού 244/2012/ΕΕ δόθηκαν όλες οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο στο σχεδιασμό ενός κτιρίου όσο και στη μετατροπή ενός υφιστάμενου, με κανόνες ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων [3]. Σειρά εφαρμογών, μελετών, οδηγιών, εκπαιδευτικών υλικών και εργαλείων έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να υποστηρίζουν τις αποφάσεις αυτές. Μια τέτοια εφαρμογή πραγματοποιείται η παρούσα εργασία. Πρόκειται για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που έχει ως σκοπό να υποστηρίξει την κατασκευή κτιρίων Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (nZEB) μέσω του προσδιορισμού της πιο ενεργειακά αποδοτικής και οικονομικά βιώσιμης λύσης. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εργαλείου και τα αποτελέσματά του μέσω ενός παραδείγματος εφαρμογής: ένα κτίριο γραφείων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματά του συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του υπολογιστικού προγράμματος ΤΕΕ ΚΕνΑΚ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται την ανάπτυξη και χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος που προωθεί την ενεργειακή ανακαίνιση των κτιρίων σε Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (nZEB).

Το υπολογιστικό πρόγραμμα βασίζεται στο πρότυπο prEN ISO/DIS 52000-1:2015 για τον προσδιορισμό της μεθοδολογίας υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων [4]. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου προκύπτουν μετά από τον προσδιορισμό των ακόλουθων παραμέτρων:

- Εσωτερικές συνθήκες κτιρίου (ανάλογα με τη χρήση, τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας, τα εσωτερικά κέρδη)
- Εξωτερικές συνθήκες κτιρίου (κλιματικά δεδομένα της περιοχής)
- Θερμικές ζώνες (ανάλογα με τη χρήση των χώρων, τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης, το ωράριο λειτουργίας, κτλ)
- Κατανάλωση ενέργειας των Η/Μ εγκαταστάσεων του κτιρίου
- Συμβολή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (εάν υπάρχουν)

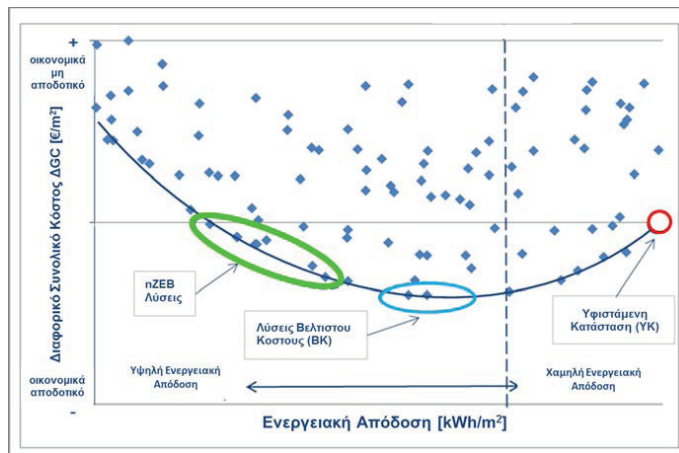
Η συγκεκριμένη μελέτη έχει επικεντρωθεί σε ένα αντιπροσωπευτικό κτίριο γραφείων του δημοσίου με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης ενεργειακής του κατάστασης με ένα πλήθος λύσεων (πακέτων μέτρων) ενεργειακής αναβάθμισης. Παράλληλα, μέσα από την αξιολόγηση, προκύπτουν οι πιο αποδοτικές και ταυτόχρονα οικονομικά βιώσιμες λύσεις και στη συνέχεια καθορίζονται οι λύσεις Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης.

2.2. Υπολογιστικό εργαλείο

Στη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, ως κτίριο Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (nZEB) θεωρείται ένα κτίριο, όταν πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

- i. Η Ενεργειακή του Απόδοση πρέπει να είναι χαμηλότερη από την ενεργειακή απόδοση του σεναρίου Βέλτιστου Κόστους (ΒΚ). Η Ενεργειακή Απόδοση ενός κτιρίου εκφράζεται ως η συνολική ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για το κτίριο ανά m^2 . Περιλαμβάνει τη ζήτηση ενέργειας για όλες τις χρήσεις - όπως ορίζεται στις Ευρωπαϊκές Οδηγίες - δηλαδή θέρμανση, ψύξη, Ζεστό Νερό Χρήσης, αερισμός, φωτισμός.
- ii. Το Διαφορικό Συνολικό Κόστος (ΔGC) πρέπει να είναι αρνητικό, δηλαδή το κτίριο nZEB είναι οικονομικά αποδοτικό.

- iii. Το Συνολικό Κόστος (GC) είναι το σύνολο όλων των δαπανών το οποίο καθορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 15459 [5] με περίοδο υπολογισμού 30 έτη και περιλαμβάνει τις επενδυτικές δαπάνες για την ενεργειακή αναβάθμιση (ανακαίνιση), το κόστος αντικατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των συστημάτων του κτιρίου καθώς επίσης και τις ετήσιες δαπάνες, ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του.
- iv. Το Διαφορικό Συνολικό Κόστος (ΔGC) ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του συνολικού κόστους του κτιρίου μετά την ενεργειακή αναβάθμιση και του συνολικού ενεργειακού κόστους του κτιρίου αν παραμείνει στην υφιστάμενη κατάσταση (ΥΚ).



Σχήμα 1: Διαφορικό Συνολικό Κόστος σε συνάρτηση με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ένα πλήθος πακέτων μέτρων για ένα κτίριο. Για κάθε μια από τις λύσεις παρουσιάζεται το διαφορικό συνολικό κόστος και η αντίστοιχη ενεργειακή απόδοση. Για την καλύτερη κατανόηση του σχήματος, σημειώνεται ότι:

- Η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου στην ΥΚ είναι η μεγαλύτερη, ενώ το διαφορικό συνολικό κόστος είναι μηδενικό (κτίριο αναφοράς).
- Για να είναι μια ενεργειακή αναβάθμιση αποδοτική πρέπει το διαφορικό συνολικό κόστος να είναι αρνητικό. Πιο συγκεκριμένα, σε διάστημα 30 ετών, το συνολικό κόστος του σεναρίου ανακαίνισης – συμπεριλαμβανομένου και του κόστους ενεργειακής αναβάθμισης - να είναι μικρότερο από το συνολικό κόστος της ΥΚ.
- Ορίζεται ένα εύρος τιμών (λύσεων) βέλτιστου κόστους (και όχι ένα μοναδικό σημείο). Πρόκειται για λύσεις ενεργειακής αναβάθμισης που οδηγούν στο χαμηλότερο ενεργειακό κόστος κατά τη διάρκεια του εκτιμώμενου οικονομικού κύκλου ζωής.
- Το εύρος των λύσεων nZEB έχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από αυτή που εμφανίζουν οι λύσεις BK και διαφορικό συνολικό κόστος μεταξύ του βέλτιστου και εκείνου του κτιρίου αναφοράς.

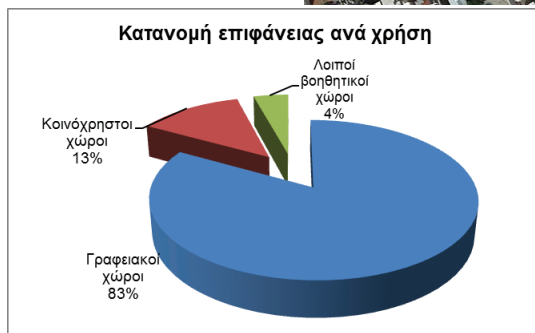
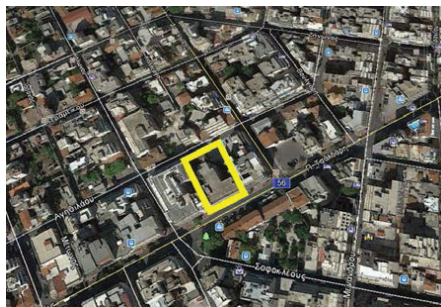
Το εργαλείο έχει δημιουργηθεί κάνοντας χρήση του προγράμματος Microsoft Excel και βασίζεται στην ανωτέρω μεθοδολογία για να αξιολογεί με αρχές βέλτιστου κόστους, ώστε να παρέχει πακέτα μέτρων που να πληρούν τα κριτήρια των κτιρίων nZEB.

2.3. Γενική περιγραφή κτιρίου

Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή του δημόσιου κτιρίου ήταν το πλήθος των κτιρίων εντός της επικράτειας, η χωροθέτησή του στον αστικό ιστό, η συνολική επιφάνεια και η χρονολογία κατασκευής του, καθώς και η ενεργειακή του κατανάλωση.

Το κτίριο που επιλέχθηκε ως τυπικό δημόσιο κτίριο γραφείων βρίσκεται επί της οδού Πειραιώς και έχει κατασκευαστεί το 1955. Η κάτοψη του κτιρίου είναι σχήματος «ταυ» και η κύρια όψη του έχει Νοτιοανατολικό προσανατολισμό με απόκλιση 30° από το Νότο.

Η συνολική επιφάνεια του κτιρίου είναι 7.101m^2 και αποτελείται από 7 υπέργειους ορόφους. Οι γραφειακοί χώροι καταλαμβάνουν το 83% της συνολικής επιφάνειας του κτιρίου (5.901m^2), οι κοινόχρηστοι χώροι το 13% (900m^2) και οι λοιποί βοηθητικοί χώροι το 4% (300m^2) [Σχήμα 2].



Σχήμα 2: Κατανομή επιφάνειας κτιρίου ανά χρήση

2.3.1. Περιγραφή κτιριακού κελύφους

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και η τοιχοποιία πλήρωσης από διπλή δρομική οπτοπλινθοδομή χωρίς θερμομόνωση. Η συνολική καθαρή επιφάνεια της εξωτερικής τοιχοποιίας (χωρίς τα ανοίγματα) είναι περίπου 3.210m^2 .

Δεδομένης της χρονικής περιόδου κατασκευής και του αριθμού ορόφων του κτιρίου, ως αντιπροσωπευτικό ποσοστό που καταλαμβάνει ο φέρων οργανισμός επί της συνολικής επιφάνειας όψεων, θεωρήθηκε το 30%, σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 [6].

Η οροφή του κτιρίου αποτελείται από οριζόντια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, χωρίς θερμομονωτική στρώση. Η συνολική επιφάνεια τόσο της οροφής όσο και του δαπέδου του ισογείου είναι περίπου 1.000m^2 .

Όλα τα υαλοστάσια του κτιρίου αποτελούνται από ξύλινο πλαίσιο και μονούς υαλοπίνακες πάχους 4mm.

Η συνολική επιφάνεια των υαλοστασίων είναι περίπου 836m^2 , αποτελεί το 21% της περιμετρικής επιφάνειας του κτιρίου [Σχήμα 3] και κατανέμεται επί των τεσσάρων όψεων σε 23% επί της νοτιοανατολικής όψης, 13% επί της βορειοδυτικής όψης, 20% επί της βορειοανατολικής και 44% επί της νοτιοδυτικής όψης [Σχήμα 4].

2.3.2. Περιγραφή ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

Όλοι οι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου είναι θερμαινόμενοι και η θέρμανσή τους παρέχεται από δύο (2) συμβατικού τύπου χαλύβδινους λέβητες πετρελαίου, ισχύος 150.000kcal/h έκαστος. Οι θερματικές μονάδες του συστήματος θέρμανσης αποτελούνται από τυπικά σώματα καλοριφέρ λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες ($90-70^\circ\text{C}$).

Η κάλυψη των αναγκών ψύξης στους γραφειακούς χώρους του κτιρίου γίνεται μέσω 150 διαιρούμενων κλιματιστικών μονάδων (split units), συνολικής ονομαστικής ισχύος 300kW .

Ο τεχνητός φωτισμός των χώρων του κτιρίου παρέχεται από φωτιστικά σώματα οροφής με λαμπτήρες φθορισμού (συμβατικούς και χαμηλής κατανάλωσης) καθώς και από λαμπτήρες πυρακτώσεως, αλογόνου και Iωδίνης. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτισμού είναι 43kW .

Τέλος, ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός που αποτελείται από Η/Υ, φωτιστικά, εκτυπωτές, κ.α., είναι συνολικής ονομαστικής ισχύος 49,75kW.



Σχήμα 3: Ποσοστό τοιχοποιίας και ανοιγμάτων



Σχήμα 4: Κατανομή υαλοστασίων ανά όψη κτιρίου

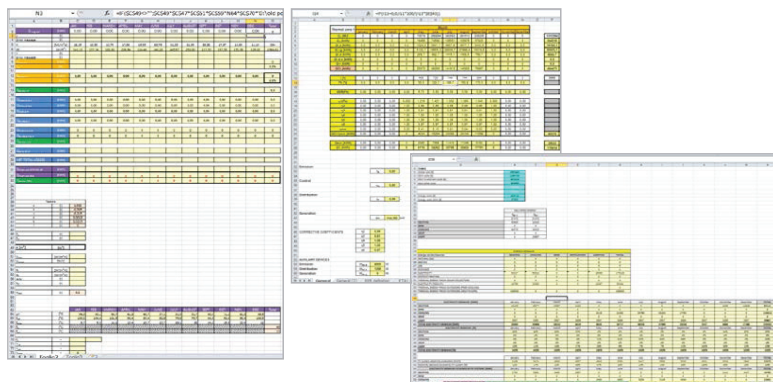
2.4. Λειτουργία υπολογιστικού εργαλείου

Το υπολογιστικό εργαλείο δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου Republic ZEB [7] από το Πολυτεχνείο του Τορίνο (POLITO) [8]. Το εργαλείο απευθύνεται στους φορείς της αγοράς και τους ιδιοκτήτες των κτιρίων και συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων για την πιο συμφέρουσα λύση ανακαίνισης κτιρίων από οικονομικής αλλά και ενεργειακής πλευράς. Είναι ένα απλό υπολογιστικό εργαλείο που αποτελείται από αρχεία excel τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μακρο-εντολές.

Το εργαλείο απαρτίζεται από τρία μέρη:

A. Τα υπολογιστικά αρχεία excel [Σχήμα 5] στα οποία έχουν εισαχθεί όλοι οι μαθηματικοί τύποι για τους υπολογισμούς που αφορούν στα παρακάτω:

- Χαρακτηριστικά κτιρίου
- Θέρμανση και Ζεστό Νερό Χρήσης
- Ψύξη
- Φωτισμό
- Αντλίες Θερμότητας
- Φωτοβολταϊκό σύστημα
- Θερμικό ηλιακό σύστημα
- Συνολικό κόστος (λειτουργικό και συντήρησης, επένδυσης, ενέργειας), κ.α.



Σχήμα 5: Υπολογιστικά αρχεία excel

Β. Το αρχείο excel στο οποίο εισάγονται τόσο τα χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους και των Η/Μ συστημάτων του κτιρίου στην υπάρχουσα κατάσταση, όσο και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, επένδυσης και ενέργειας [Σχήμα 6]. Πιο συγκεκριμένα, στο αρχείο εισάγονται από τον χρήστη:

- Τα κλιματολογικά δεδομένα
- Τα χαρακτηριστικά
 - ο του κτιρίου (επιφάνεια, όροφοι, όγκος κτλ)
 - ο της θερμικής ζώνης (τοιχοποιία, υαλοστάσια, συντελεστής θερμοπερατότητας, κτλ)
 - ο του συστήματος θέρμανσης και ΖΝΧ (βαθμός απόδοσης, βοηθητικές μονάδες κτλ), καθώς και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που προτείνονται κατά την ανακαίνιση
 - ο του συστήματος ψύξης και των προτεινόμενων συστημάτων
 - ο του θερμικού ηλιακού συστήματος
 - ο του φωτοβολταϊκού συστήματος
 - ο του συστήματος φωτισμού
- Τα κόστη συντήρησης και αντικατάστασης πριν και μετά την ανακαίνιση

Σχήμα 6: Αρχείο excel με τα στοιχεία που εισάγονται από το χρήστη

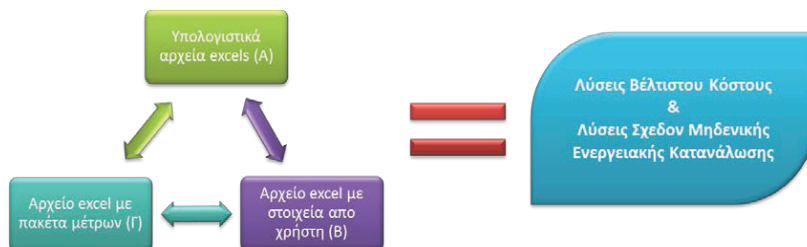
Γ. Το αρχείο excel [Σχήμα 7] από το οποίο προκύπτουν τα πακέτα μέτρων (σενάρια) για τις λύσεις βέλτιστου κόστους και nZEB. Τα στοιχεία που εισάγονται σε αυτό το αρχείο excel είναι:

- Τα χαρακτηριστικά των παρεμβάσεων (συντελεστές θερμοπερατότητας, βαθμός απόδοσης συστημάτων, συντελεστές, κ.α.)

Το Σχήμα 7: Αρχείο excel από το οποίο προκύπτουν οι λύσεις βέλτιστου κόστους και nZEB

- Το κόστος της κάθε παρέμβασης
- Οι πιθανοί συνδυασμοί των παρεμβάσεων

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής λειτουργίας του υπολογιστικού εργαλείου.



Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής λειτουργίας υπολογιστικού εργαλείου

3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με την εισαγωγή των δεδομένων και των χαρακτηριστικών του κτιρίου στο υπολογιστικό εργαλείο προκύπτουν τα αποτελέσματα της ΥΚ.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι παραδοχές και τα χαρακτηριστικά διαφανών και αδιαφανών δομικών στοιχείων του κελύφους καθώς και ο Η/Μ εξοπλισμός, ως έχουν στην ΥΚ του κτιρίου.

Πίνακας 1: Συντελεστές θερμοπερατότητας αδιαφανών στοιχείων κελύφους, χαρακτηριστικά συστημάτων υαλοστασίων και Η/Μ εξοπλισμός

Δομικό στοιχείο		Συντελεστής θερμοπερατότητας κτιρίου (W/(m ² K))		
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα		2,20		
		3,40		
Εξωτερική οριζόντια επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα		3,05		
Δάπεδα σε επαφή με έδαφος ή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους		3,10		
Τύπος Υαλοστασίου	U _g (W/(m ² K))	U _f (W/(m ² K))	U _w (W/(m ² K))	
Υαλοπίνακας	5,7	-	4,7	
Πλαίσιο	-	2,2		
Ηλεκτρομηχανολογικός Εξοπλισμός				
Θέρμανσης		Λέβητας πετρελαίου COP: 0,89		
Ψύξης		Split units EER:1,5		
Φωτισμού		Συνολική ισχύς 6W/m ²		

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υπολογιστικό εργαλείο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα Υφιστάμενης Κατάστασης κτιρίου (ΥΚ)

Πρωτογενής ενέργεια [kWh/m ² a]	310
Συνεισφορά από PVs [kWh/m ²]	-
Ποσοστό ΑΠΕ (Θέρμανση, Ψύξη)	-
Κόστος ενέργειας [€/m ²]	475
Κόστος επένδυσης [€/m ²]	-
Λειτουργικό κόστος & κόστος συντήρησης [€/m ²]	97

Η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου στην ΥΚ είναι υψηλή και ανέρχεται στις 310kWh/m² όπως και το συνολικό κόστος, δηλαδή το κόστος ενέργειας, συντήρησης και λειτουργίας, το οποίο είναι 572€/m² για χρονικό διάστημα 30 ετών.

3.1. Σενάριο Βέλτιστου Κόστους (ΒΚ)

Από τις παρεμβάσεις που εισήχθησαν στο υπολογιστικό εργαλείο προέκυψε ότι το σενάριο ΒΚ έχει τα εξής χαρακτηριστικά [Πίνακας 3]:

Πίνακας 3: Σενάριο Βέλτιστου Κόστους (ΒΚ)

Χαρακτηριστικά κτιρίου		
Κέλυφος κτιρίου	U (W/(m ² K))	
Τοιχοποιία	2,20	
	3,40	
Οριζόντια οροφή	3,05	
Υαλοστάσια	2,80	
Σύστημα θέρμανσης	Γεωθερμική Α/Θ	COP:6.5
Σύστημα ψύξης		EER:5.5
Φωτοβολταϊκό σύστημα	37kWp	

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα σεναρίου Βέλτιστου Κόστους

Πρωτογενής ενέργεια [kWh/(m ² a)]	120
Συνεισφορά από PVs [kWh/m ²]	0,28
Ποσοστό ΑΠΕ (Θέρμανση, Ψύξη) [%]	44
Κόστος ενέργειας [€/m ²]	150
Κόστος επένδυσης [€/m ²]	114
Λειτουργικό κόστος & κόστος συντήρησης [€/m ²]	73
Περίοδος αποπληρωμής [έτη]	6

Στο σενάριο ΒΚ η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας έχει μειωθεί στις 120kWh/m², δηλαδή κατά 190 kWh/m². Η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος ανέρχεται στις 0,28kWh/m², ενώ το ποσοστό των ΑΠΕ στο συγκεκριμένο σενάριο είναι 44%. Τέλος το συνολικό κόστος έχει μειωθεί κατά 235€/m² και ανέρχεται στα 337€/m² ενώ η περίοδος αποπληρωμής εκτιμάται στα 6 έτη.

3.2. Σενάρια αναβάθμισης κτιρίου σε Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης nZEB

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι παρεμβάσεις μέσω των οποίων το κτίριο αναβαθμίζεται σε κτίριο nZEB. Μεταβάλλοντας ορισμένες από τις παραμέτρους στο υπολογιστικό εργαλείο προκύπτει μια σειρά από σενάρια nZEB. Πιο συγκεκριμένα, στο αρχείο excel Γ εισάγονται τα χαρακτηριστικά των παρεμβάσεων σε διαφορετικά επίπεδα (για παράδειγμα στην θερμομόνωση του κελύφους υπάρχουν τρεις διαφορετικοί συντελεστές θερμοπερατότητας και οι αντίστοιχες τιμές κόστους κ.ο.κ.). Για τον προσδιορισμό διαφορετικού nZEB σεναρίου μπορεί να επιλεγεί το πρώτο επίπεδο της παρέμβασης στο κέλυφος, το δεύτερο επίπεδο της παρέμβασης στην οροφή κ.ο.κ.. Τροποποιώντας τα επίπεδα των παρεμβάσεων προκύπτει μεγάλος αριθμός συνδυασμών και λύσεων (σεναρίων). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν για τέσσερα (4) σενάρια nZEB.

Πίνακας 5: Σενάρια nZEB

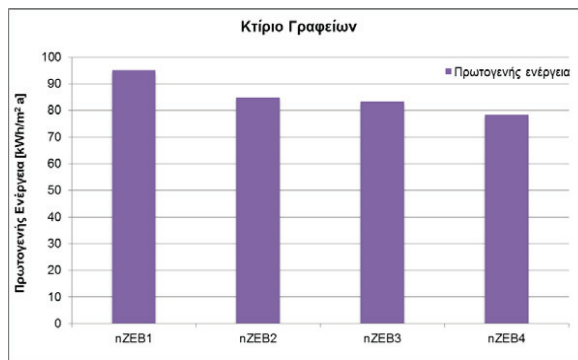
Χαρακτηριστικά κτιρίου								
	nZEB 1		nZEB 2		nZEB 3		nZEB 4	
Κέλυφος κτιρίου	U (W/(m ² K))							
Τοιχοποιία	0,37		0,37		0,37		0,30	
Οριζόντια οροφή	0,40		0,40		0,36		0,32	
Υαλοστάσια	2,50		2,50		2,00		2,00	
Σύστημα θέρμανσης	A/Θ	EER:5,5	A/Θ	COP:6,5	A/Θ	COP:6,5	A/Θ	COP:6,5
Σύστημα ψύξης	αέρα-νερού	COP:4,5	Γεωθερμική	EER:5,5	Γεωθερμική	EER:5,5	Γεωθερμική	EER:5,5
Φωτοβολταϊκό σύστημα	37kWp		30kWp		30kWp		37kWp	

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 6 και στο Σχήμα 9.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα nZEB σεναρίων

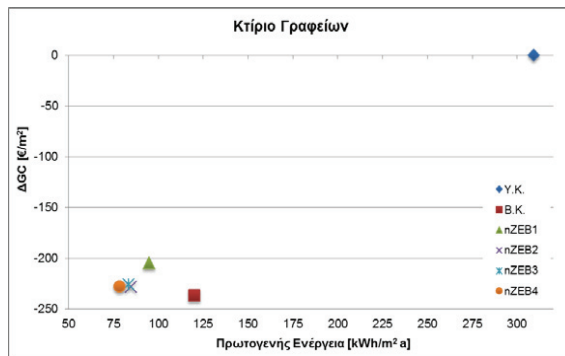
	nZEB 1	nZEB 2	nZEB 3	nZEB 4
Πρωτογενής ενέργεια [kWh/m ² a]	95	85	83	78
Συνεισφορά από PVs [kWh/m ²]	0,28	0,16	0,16	0,28
Ποσοστό ΑΠΕ (Θέρμανση, Ψύξη) [%]	32,3	35,3	34,5	36,0
Κόστος ενέργειας [€/m ²]	121	109	107	101
Κόστος επένδυσης [€/m ²]	156	149	152	155
Λειτουργικό κόστος & κόστος συντήρησης [€/m ²]	92	87	88	90
Περίοδος αποπληρωμής [έτη]	8	7	7	7

Στα nZEB σενάρια η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 95kWh/m² και 78kWh/m² και είναι αρκετά χαμηλότερη από την κατανάλωση του σεναρίου ΒΚ. Η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι 0,28kWh/m² και 0,16kWh/m², ανάλογα με το σενάριο, ενώ το ποσοστό των ΑΠΕ κυμαίνεται από 32,3% έως 36%. Τέλος το συνολικό κόστος για το κάθε σενάριο είναι 369€/m², 345€/m², 347€/m² και 346€/m² αντίστοιχα, ενώ η περίοδος αποπληρωμής είναι τα 7 έτη με εξαίρεση το nZEB 1 που είναι 8 έτη.



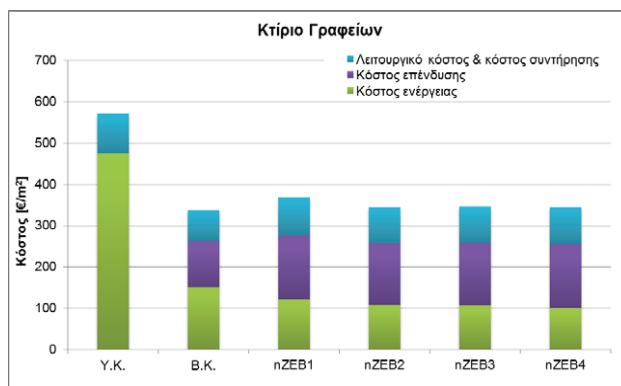
Σχήμα 9: Πρωτογενής ενέργεια για τα Σενάρια nZEB

Στο διάγραμμα διαφορικού συνολικού κόστους [Σχήμα 10] φαίνονται τα αποτελέσματα για την ΥΚ, το σενάριο ΒΚ και τα τέσσερα nZEB σενάρια. Σύμφωνα με την ανάλυση της παραγράφου 2.2 το σενάριο nZEB 4 είναι η πιο συμφέρουσα λύση ανακαίνισης από επενδυτικής αλλά και ενεργειακής πλευράς.



Σχήμα 10: Διάγραμμα συνολικού διαφορικού κόστους

Στο παρακάτω διάγραμμα [Σχήμα 11] παρουσιάζεται το συνολικό κόστος του κτιρίου (λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης, κόστος επένδυσης και κόστος ενέργειας) για την ΥΚ, το σενάριο ΒΚ και τα τέσσερα nZEB σενάρια. Σημειώνεται ότι το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης, καθώς και το κόστος ενέργειας αφορά οριζόντια 30 ετών.



Σχήμα 11: Συνολικό κόστος για την ΥΚ, το ΒΚ και τα σενάρια nZEB

3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικού εργαλείου με το υπολογιστικό εθνικό πρόγραμμα TEE ΚΕνΑΚ

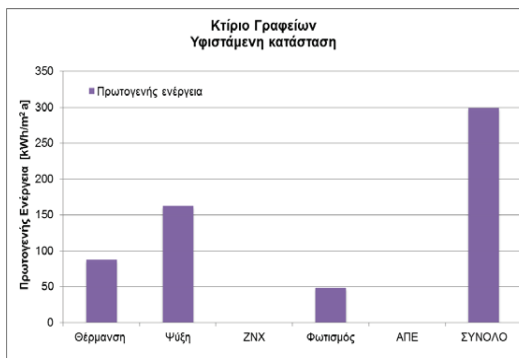
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό εργαλείο με τα αντίστοιχα από το λογισμικό TEE ΚΕνΑΚ (έκδοση v.1.29).

Σημειώνεται ότι οι προδιαγραφές και οι παραδοχές που έγιναν ακολουθούν τις απαιτήσεις κατά ΚΕνΑΚ, καθώς και τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν την ΥΚ του κτιρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 καθώς και στο Σχήμα 12.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα Υφιστάμενης Κατάστασης κτιρίου (ΥΚ)

Πρωτογενής ενέργεια [kWh/m ²]	
Θέρμανση	87,7
Ψύξη	162,4
ZNX	0
Φωτισμός	48,6
ΑΠΕ	0
ΣΥΝΟΛΟ	298,7
Ενεργειακή κατάταξη	Δ



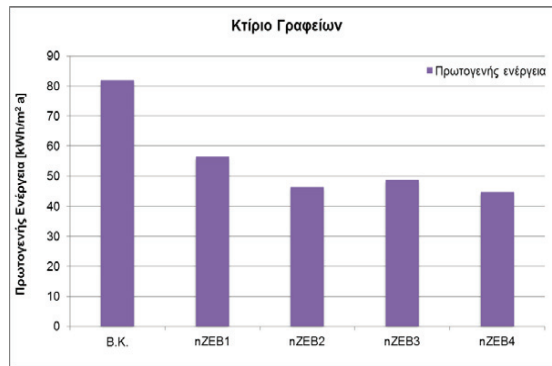
Σχήμα 12: Υφιστάμενη κατάσταση κτιρίου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του λογισμικού TEE ΚΕνΑΚ, η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανέρχεται στις 298,7kWh/m² και το κτίριο κατατάσσεται ενεργειακά στην κατηγορία Δ.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων έγιναν υπολογισμοί με το λογισμικό TEE ΚΕνΑΚ λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του σεναρίου Βέλτιστου Κόστους (BK) καθώς και των τεσσάρων nZEB λύσεων. Στον Πίνακα 8 και το Σχήμα 13 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για όλα τα παραπάνω σενάρια. Από τους παραπάνω υπολογισμούς προέκυψε ότι το σενάριο BK έχει συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας 82,1kWh/m², ενώ τα σενάρια nZEB έχουν χαμηλότερη πρωτογενή κατανάλωση η οποία κυμαίνεται από 56,6 kWh/m² έως 44,9 kWh/m².

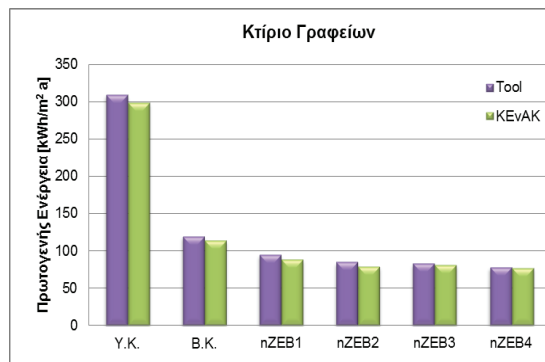
Πίνακας 8: Αποτελέσματα σεναρίου Βέλτιστου Κόστους και σεναρίων nZEB

Πρωτογενής ενέργεια [kWh/m ²]	BK	nZEB 1	nZEB 2	nZEB 3	nZEB 4
Θέρμανση	23,7	10,3	11,1	8,6	9,6
Ψύξη	42,4	34,8	19,6	28,9	19,3
ZNX	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Φωτισμός	48,6	44,0	48,6	44	48,6
ΑΠΕ	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
ΣΥΝΟΛΟ	82,1	56,6	46,6	49	44,9
Ενεργειακή κατάταξη	A	A	A+	A+	A+



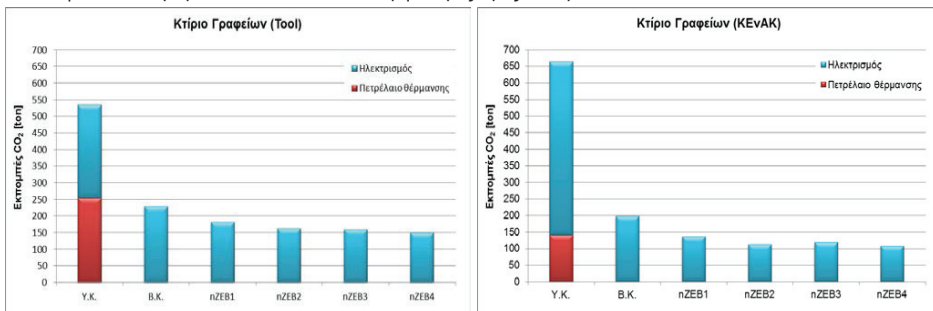
Σχήμα 13: Πρωτογενής ενέργεια για τα σενάρια BK και nZEB

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας όπως προέκυψε από το υπολογιστικό εργαλείο και το λογισμικό TEE ΚΕνΑΚ για την ΥΚ καθώς και όλα τα σενάρια. Από το σχήμα προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στην ΥΚ, στο BK καθώς και στα σενάρια nZEB είναι παρόμοια για τα δύο προγράμματα (Tool και ΚΕνΑΚ), υψηλότερη κατά το υπολογιστικό εργαλείο, με μέση απόκλιση τιμών της τάξεως του 4% περίπου.



Σχήμα 14: Πρωτογενής ενέργεια για την ΥΚ, τα σενάρια BK και nZEB από το Tool και το λογισμικό TEE ΚΕνΑΚ

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων. Φαίνεται ότι υπάρχει μια απόκλιση της τάξεως του 5,6%, με το υπολογιστικό εργαλείο να παρέχει υψηλότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Σημειώνεται ότι μόνο στην ΥΚ το λογισμικό TEE ΚΕνΑΚ δίνει υψηλότερες τιμές εκπομπών από το Tool.



Σχήμα 15: Εκπομπές CO₂ υπολογιστικού εργαλείου και κατά ΚΕνΑΚ

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αύξηση των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, στην κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας σύμφωνα με τις οδηγίες της ΕΕ.

Το συγκεκριμένο εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης επιλογής διαφόρων σεναρίων, τα οποία προκύπτουν από ένα πλήθος παρεμβάσεων και μέσω ρουτίνας (παραμετρικής ανάλυσης) προτείνει τη βέλτιστη λύση από ενεργειακή αλλά και οικονομική σκοπιά.

Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου γραφείων που χρησιμοποιήθηκε ως περίπτωση εφαρμογής, σύμφωνα με το υπολογιστικό εργαλείο, για την ΥΚ υπολογίστηκε στις 310KWh/m². Στο σενάριο ΒΚ επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας κατά 61%, ενώ στα σενάρια nZEB η κατανάλωση μειώθηκε κατά μέσο όρο 72%.

Συγκρίνοντας το υπολογιστικό εργαλείο με το λογισμικό TEE KEvAK προκύπτει ότι στην ΥΚ, καθώς και σε όλα τα σενάρια (ΒΚ και nZEB), οι τιμές της πρωτογενούς ενέργειας είναι παρόμοιες και συγκεκριμένα εμφανίζουν απόκλιση μόνο 4%.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το εργαλείο που παρουσιάστηκε αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου IEE/13/886/SI2.674899 «Refurbishment of the Public building stock towards nZEB – Republic_ZEB» το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο του προγράμματος Ευφυής Ενέργεια για την Ευρώπη – IEE.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Clean energy for Europe: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>]
- [2] Οδηγία 2010/31/ ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (αναδιατύπωση) [ΕΕ L 153].
- [3] Κατ' εξουσιοδότηση Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 244/2012 της Επιτροπής της 16ης Ιανουαρίου 2012 προς συμπλήρωση της οδηγίας 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων με τον καθορισμό συγκριτικού μεθοδολογικού πλαισίου για τον υπολογισμό των επιπέδων βέλτιστου κόστους των ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων και των δομικών στοιχείων (ΕΕ L. 81).
- [4] prEN ISO/DIS 52000-1:2015, Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment - Part 1: General framework and procedures, European Committee for Standardization –CEN.
- [5] EN 15459:2007, Energy performance of buildings. Economic evaluation procedure for energy systems in buildings, European Committee for Standardization –CEN.
- [6] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010: Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης, Γ' έκδοση, 2014.
- [7] <http://www.republiczeb.org/>
- [8] Παραδοτέο έργου: D1.2- Publishable report V5, Summary report of the RePublic_ZEB project, 2016.

